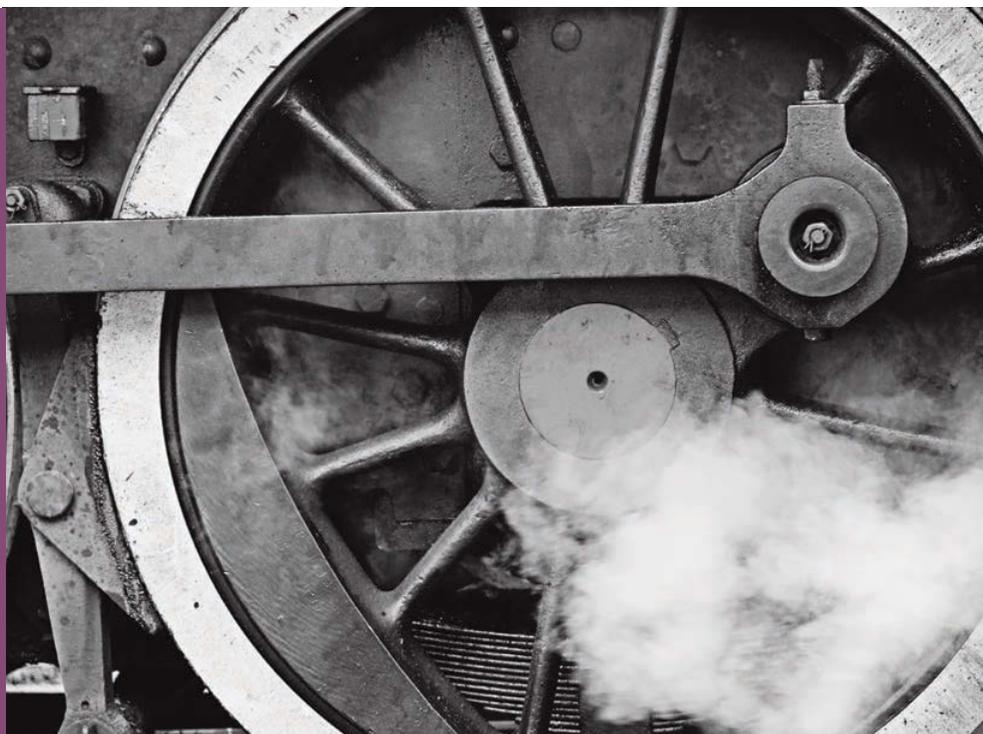


LaRevueDurable avec Jacques Grinevald*

Entropie et flèche du temps : le rendez-vous manqué de la civilisation industrielle

La loi de l'entropie croissante, ou deuxième principe de la thermodynamique, est très précieuse pour comprendre la civilisation industrielle et son impact sur l'environnement global, le système Terre. Elle indique que l'énergie non renouvelable que l'activité humaine transforme se dégrade de façon irréversible. Mais des obstacles culturels profonds bloquent depuis la découverte de cette loi, au XIX^e siècle, sa pleine réception dans les sociétés industrielles.



31

Croire au sous-développement de l'Occident avant la Révolution industrielle est une erreur de perspective totale. En réalité, la civilisation européenne vit au XVIII^e siècle un apogée dont les racines remontent à l'Antiquité et au Moyen Âge. Ses avancées culturelles, économiques, scientifiques, technologiques et militaires sont exceptionnelles.

Symbole de stabilité

Cette civilisation ignore bien sûr tout de la thermodynamique. C'est le cas des savants qui fondent la mécanique, l'étude des forces et des mouvements qui régissent l'univers des machines et la machine de l'univers : Galilée (1564-1642), Isaac Newton (1642-1727), Leonhard Euler (1707-1783), Joseph-Louis

Lagrange (1736-1813) ou Pierre-Simon de Laplace (1749-1827).

Avant la Révolution industrielle, la métaphore dominante du monde est l'architecture, la structure statique du temple, la marine à voile, l'horloge mécanique ou les moulins à eau. Malgré, notamment, l'émergence de théories annonciatrices de l'évolution des espèces – celles, par exemple, de Benoît de Maillet (1656-1738) et de Buffon (1707-1788) –, le monde occidental reste proche de celui de l'architecte romain Vitruve, au I^{er} siècle avant Jésus-Christ (Grinevald, 1979).

Le magnifique ouvrage en quatre volumes de l'ingénieur militaire et professeur de mathématiques Bernard Forest de Bélidor (1698-1761), *Architecture hydraulique*, dont la première édition date de 1737-1753, illustre à merveille le paradigme vitruvien de la technologie de l'Europe des Lumières, l'un des sommets de la culture classique de l'Occident.

Les roues hydrauliques sont perfectionnées et de plus en plus utilisées jusque dans la première moitié du XIX^e siècle. Un autre ingénieur français, Claude Navier (1785-

1836), réédite en 1819, avec un appareil critique fondamental, le premier volume (sur les machines hydrauliques) de *l'Architecture hydraulique* de Bélidor, véritable bible des ingénieurs de l'Europe proto-industrielle.

La roue du moulin symbolise le monde de l'économie néolithique, dans lequel les cycles de la matière et de la vie sont sans fin, en phase avec des principes mathématiques éternellement réversibles. Le temps, dans cette cosmologie et cette métaphysique, n'a pas de sens. L'âge d'or peut se situer dans le passé comme dans l'avenir.

Pour l'essentiel, la civilisation occidentale des Lumières pense ainsi s'inscrire dans un monde fixe, stable, immuable, quasi éternel. Au-delà des lois de la mécanique classique, cette croyance se manifeste, par exemple, dans l'économie de la nature de Carl von Linné (1707-1778), qui n'envisage pas l'évolution des espèces, la Physiocratie de François Quesnay (1694-1774), dans laquelle la terre végétale de l'agriculture est la seule source de richesse, ou encore la théorie cyclique du « système de la Terre » de James Hutton (1726-1797).

* LaRevueDurable a élaboré ce texte en collaboration avec Jacques Grinevald, philosophe et historien du développement scientifique et technologique, professeur à l'Institut des hautes études internationales et du développement (IHEID) et à l'Université de Genève, en Suisse. LaRevueDurable est cependant seule responsable de certains choix et formulations. Et remercie vivement deux relecteurs pour leurs commentaires et conseils.

Dissymétrie de la nature

Arrive la Révolution industrielle. Tous les manuels d'histoire situent ses débuts en Grande-Bretagne, à la fin du XVIII^e siècle. Elle aurait ensuite peu à peu diffusé en Europe et dans le reste du monde. Mais ni la littérature générale, ni l'histoire économique, ni celle des techniques et des sciences ne donnent les bons points de repère pour comprendre comment elle bouleverse l'ordre scientifique et culturel hérité des siècles passés.

Une lecture plus juste de cet épisode consiste à en faire un phénomène pertinent pour analyser comment la civilisation technoscientifique occidentale des XIX^e et XX^e siècles se met à transformer le monde en puisant les ressources minérales et les énergies fossiles dans les entrailles de la Terre.

A cet égard, le meilleur point de départ est sans aucun doute l'œuvre que Sadi Carnot (1796-1832) publie, en 1824, à l'âge de 28 ans. Ses *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* sont une œuvre de génie, un classique d'un charme incomparable, qui constitue le véritable discours inaugural de la révolution thermo-industrielle.

Comme de nombreux Français après la défaite de Napoléon, Sadi Carnot, formé dans la meilleure école scientifique du monde de l'époque, l'Ecole polytechnique de Paris, voit dans les machines à vapeur de James Watt (1736-1819) et de ses émules le secret de la supériorité industrielle et militaire de la victorieuse Angleterre. Les machines à feu lui « paraissent destinées à produire une grande révolution dans le monde civilisé ».

En France, au début du XIX^e siècle, les ingénieurs-savants poursuivent plus que jamais la tradition de l'architecture hydraulique : ils inventent la turbine hydraulique. L'hydraulique devient ainsi une science d'ingénieur. Le moulin à eau de la civilisation médiévale cède la place à une machine moderne, à laquelle s'applique une « théorie des machines » aux fondements scientifiques.

« Machines à feu »

Sadi Carnot part de cette science en plein essor. Dans une expérience de pensée géniale, il imagine que les machines à feu fonctionnent selon le même schéma que l'eau qui fait tourner les roues hydrauliques dont le propre père, Lazare Carnot, ingénieur du Génie, a contribué à établir la théorie scientifique.

Au début du XIX^e siècle, les roues hydrauliques et les machines thermiques ne représentent pas encore deux paradigmes séparés, mais plutôt entremêlés. La thermodynamique émerge comme une bifurcation inattendue de la longue tradition qui remonte à Vitruve. C'est Carnot, le fils, qui tue Vitruve. Mais on mettra des lustres à élucider ce crime.

Sadi Carnot opère une analogie entre l'eau qui coule du haut vers le bas dans une machine hydraulique et « la différence de température » entre la source chaude et la source froide d'une machine thermique. C'est ce potentiel qui produit la puissance motrice de la chaleur dans sa « machine à feu » idéale, réduite à ses éléments essentiels, à son principe physique élémentaire.

Le concept carnotien de « machine à feu » est en effet bien plus abstrait et général que celui de machine à vapeur. D'où la prodigieuse fécondité des *réflexions* de Sadi Carnot, que l'histoire des sciences et des techniques finira par reconnaître comme un classique unique en son genre. Les concepts de rendement et de travail mécanique y sont présents. Ils seront formalisés, dans les années 1820, dans le cadre de la nouvelle Mécanique industrielle.

Le grand mérite de Sadi Carnot est d'avoir compris que la chaleur sans différence de température serait inutile. Sa formule sans doute la plus révolutionnaire est d'affirmer qu'il faut du chaud *et* du froid pour produire du mouvement, de la force vive ou du travail. Et c'est le retour de la chaleur à l'équilibre thermique qui ouvre la porte à la découverte de l'irréversibilité inhérente à la physique des transformations de l'énergie.

Cette irréversibilité infirme la vision stable et cyclique du monde qui, malgré le christia-

nisme, imprègne la culture scientifique européenne classique. Il n'est donc pas surprenant que la civilisation occidentale éprouve une immense peine à intégrer la « révolution carnotienne » à son corpus de savoirs... ni qu'elle s'y refuse, voire s'y oppose.

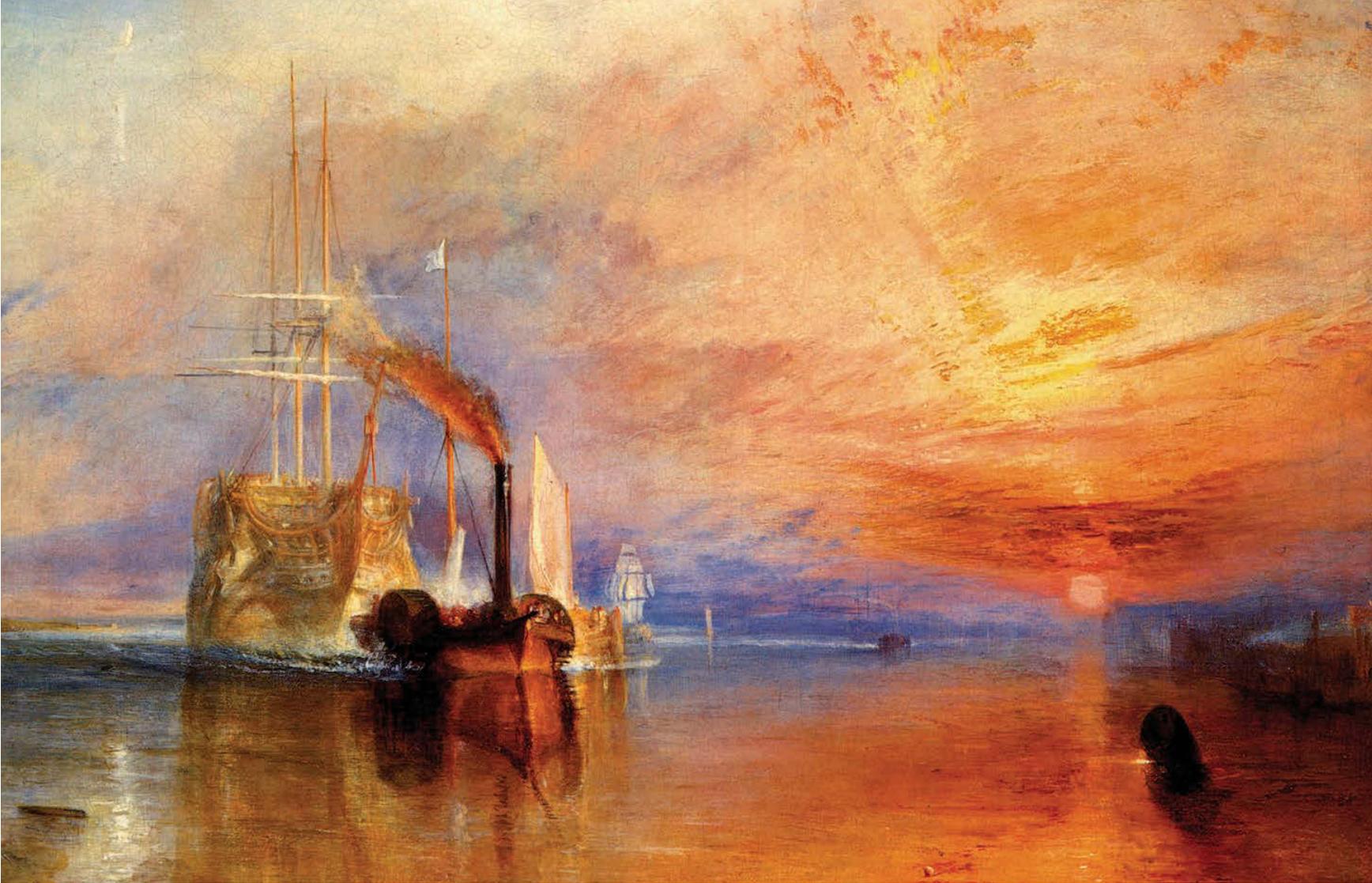
La nouvelle vision du monde que cette découverte impose aura ainsi un mal fou à casser le cercle, à briser le bel équilibre de l'Europe du XVIII^e siècle. Au XIX^e siècle, toute l'idéologie rationaliste occidentale continue à privilégier les grandes lois d'équivalence, de conservation, de stabilité, à nier l'irréversibilité de la transformation de l'énergie.

Carnot redécouvert

Carnot meurt prématurément en 1832, sans avoir donné suite à sa thèse, qui n'a guère attiré l'attention au moment de sa parution. Ce n'est que près de vingt ans plus tard que les physiciens William Thomson (1824-1907) en Grande-Bretagne, et Rudolf Clausius (1822-1888) en Allemagne, redécouvrent son travail indépendamment l'un de l'autre. Cela grâce à l'étude de la « théorie de Carnot » que l'ingénieur polytechnicien Emile Clapeyron (1799-1864) a publiée en 1834 dans le *Journal de l'Ecole polytechnique*.

William Thomson pose les bases des deux principes de la thermodynamique dans les années 1840. Il comprend dès 1848 qu'on peut établir, à partir de Carnot, l'échelle des températures absolues : elle portera le nom de Kelvin après son anoblissement par la reine Victoria, en 1862. Le zéro Kelvin se situe à -273° Celsius. Il est impossible de descendre plus bas. On ne peut même pas atteindre ce zéro absolu. Cette limite est liée à la création de ce que Clausius appellera bientôt l'« entropie ».

En phase avec la mentalité industrielle et l'idéologie économique de la *pax britannica*, Thomson développe une interprétation de la science de l'énergie qui est directement liée aux machines motrices de la société industrielle et de sa conquête du monde. Il souligne la dissipation (ou dégradation) de l'énergie mécanique utilisable, la perte d'énergie en termes d'utilité économique, et extrapole, en 1852, cette tendance à l'univers.



Mais c'est Rudolf Clausius qui, le premier, établit de façon claire, à l'École polytechnique de Zurich, en 1865, les deux premiers « théorèmes » de la thermodynamique, en conclusion de sa *Théorie mécanique de la chaleur*. Le premier théorème soutient que *l'énergie du monde est constante*. Le second invente le concept – et le mot – d'entropie, et pose que *l'entropie du monde tend vers un maximum*.

Cela signifie que l'énergie du monde se dégrade (l'énergie utilisable y diminue) d'une façon irréversible. Cette formulation hardie de Clausius entraîne une vive controverse philosophique, cosmologique et théologique. Mais la thermodynamique classique est définitivement fondée.

Deux ans plus tard, Clausius vulgarise sa loi de l'« entropie croissante » lors d'une conférence donnée, à Francfort-sur-le-Main, devant une assemblée scientifique. Il précise qu'il s'agit d'une loi universelle et soutient que le temps des transformations énergétiques est unidirectionnel et irréversible. La nouvelle théorie mécanique de la chaleur contredit ainsi l'idée d'un temps réversible.

Pour les physiciens, c'est un coup de théâtre. Car alors que l'incendie se propage partout, que le machinisme et la puissance motrice du feu détrônent peu à peu le moulin à eau, la marine à voile et l'horloge, les savants auxquels Clausius s'adresse s'accrochent à l'idée d'un temps réversible et chronométrique.

Le Dernier Voyage du Téméraire, tableau de William Turner (1775-1851) réalisé en 1839. « Elle est morte, la marine en bois. Le Fighting Temeraire est remorqué à son dernier mouillage pour y être démolí. Contrairement à ce que l'histoire des gloires raconte, la vraie bataille n'a pas eu lieu à Trafalgar. Le vieux vaisseau de ligne n'est pas mort de sa victoire. Il est assassiné par son remorqueur. » Extrait tiré de Turner traduit Carnot, Michel Serres, in *Hermes III*, La traduction, Les Éditions de Minuit, Paris, 1974. Un livre dédié à la Terre.

En 1849, Thomson a décrit la « machine idéale » de Carnot comme un « moteur thermo-dynamique parfait ». C'est la première occurrence du mot. Mais, signe de leurs difficultés à sortir de l'interprétation mécaniste du

1824, année prophétique

Au début du XIX^e siècle, personne n'entrevoit les deux dimensions aujourd'hui les plus frappantes des effets de la civilisation thermo-industrielle : l'épuisement programmé des combustibles fossiles qui font tourner les machines ; la production et l'accumulation de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère qui induit un surcroît d'effet de serre responsable d'un réchauffement de la Terre.

Le physicien et mathématicien français Joseph Fourier (1768-1830) rend publique sa découverte de l'effet de serre en 1824, soit l'année même où Sadi Carnot publie ses réflexions à l'origine de la thermodynamique. C'est donc simultanément qu'en France, deux savants identifient les deux composantes de la problématique climat-énergie qui, près de deux siècles plus tard, font tous les jours l'actualité.

Il n'y aura pas indéfiniment de combustibles fossiles pour faire tourner la société industrielle. Et l'environnement global ne pourra pas longtemps encore absorber les rejets de leur combustion à la vitesse à laquelle ils sont produits depuis un demi-siècle sans que ses équilibres n'en soient bouleversés, au péril des sociétés humaines.

Ce n'est pas tout à fait un hasard si la physique fondamentale de ces

deux grandes limites de la civilisation thermo-industrielle à l'épanouissement humain apparaît en même temps. Et il est intéressant de mettre l'une et l'autre en perspective historique, car elles ont aussi à peu près les mêmes gradients de reconnaissance depuis deux siècles.

LRD avec JG.

monde, les physiciens du XIX^e siècle parleront longtemps encore de la « théorie mécanique de la chaleur ».

Blocage

Au tournant des XIX^e et XX^e siècles, le paysage se complique très fortement. Car les savants vont faire en sorte que l'irréversibilité de l'entropie croissante ne bouleverse pas les fondements philosophiques de la science mécaniste de l'Occident comme il aurait été logique qu'elle le fasse. Le physicien Ludwig Boltzmann (1844-1906) et le physico-chimiste Josiah Willard Gibbs (1839-1903), puis le physicien Max Planck (1858-1947) interprètent et expliquent en effet la loi de l'entropie comme une notion essentiellement probabiliste.

Les avocats du paradigme mécaniste classique voient dans les manifestations de l'irréversibilité une illusion anthropomorphique. C'est notamment l'intime conviction d'Albert Einstein (1879-1955) : il veut croire que l'irréversibilité est un défaut de perception¹. Ce serait le point de vue humain qui veut voir le *devenir* humain alors qu'en réalité le monde *est*. Sur ce plan, Einstein, de même que Boltzmann, Gibbs, Planck et bien d'autres, restent fidèles à la mécanique céleste de Laplace.

C'est ainsi que dans la formulation probabiliste que Boltzmann donne de l'entropie croissante, son irréversibilité repose sur des fondements mécaniques intrinsèquement... réversibles ! Cette « révolution probabiliste » de la nature, qui se situe à l'échelle moléculaire, triomphe avec la mécanique statistique², que Boltzmann et Gibbs contribuent à fonder, et qui « sauve » le paradigme mécaniste, désormais « néoclassique ».

Einstein partage la thèse de Boltzmann : les processus élémentaires qu'étudie la mécanique statistique ignorent la « flèche du temps » : « Dans l'élémentaire, tout processus a son inverse. » « Malheur donc à la théorie de la relativité, si elle devait pécher contre ce principe concernant la flèche du temps. »

Les difficultés qu'engendre cette réduction du second principe de la thermodynamique

Christianisme, apocalypse et entropologie !

Le débat entre la « flèche du temps » et l'éternité de l'univers remonte aux origines du christianisme : en rupture avec les philosophes grecs pour qui les cycles du monde sont éternels, les chrétiens affirment leur foi dans un monde avec un début et une fin. La culture européenne, fondamentalement chrétienne, se réfère ainsi à la Bible, qui commence avec la création du monde et prévoit un Jugement dernier.

Philosophe, mathématicien, astronome, historien, patron de la Royal Society, gardien de

la monnaie et grand commis de l'Etat, Newton fonde la mécanique moderne, mais il est en fait peu « mécaniste » : profondément religieux, il s'intéresse à la théologie, étudie de près les chronologies des anciens royaumes, médite sur l'Apocalypse.

La mécanique céleste de Laplace s'appuie sur l'œuvre de Newton, mais évince l'hypothèse de Dieu : il n'y a à nouveau ni début ni fin, les équations sont éternellement réversibles. Sans genèse ni apocalypse, le paradigme méca-

niste aboutit à un mouvement perpétuel, à l'instar de la perspective grecque ancienne.

Un nouveau mouvement de balancier a lieu à la fin du XIX^e siècle : le paradigme carnotien de la modernité thermo-industrielle contredit la mécanique laplacienne et ses lois réversibles de l'univers. Si l'entropie atteint un maximum, c'est la fin du monde. Il y a de l'apocalyptique dans l'imaginaire de l'« entropologie », écrit Claude Lévi-Strauss (1908-2009) dans *Tristes tropiques* (1955). LRD avec JG

au formalisme de la mécanique statistique sont très profondes. Elles sont pourtant en général considérées comme résolues ou négligeables. De temps à autre, cependant, des voix dissidentes s'élèvent pour signaler que cette vision statistique et moléculaire de la nature est incapable de tenir compte du caractère imprévisible et irréversible des processus évolutifs qui se déploient sur Terre. Ce sera le cas de Nicholas Georgescu-Roegen (1906-1994) (page 35).

L'entropie ouvre ainsi une crise de la connaissance. Elle devient une quantité particulièrement abstraite – équivalente au logarithme d'une probabilité ! – associée aux formalismes mathématiques de la mécanique statistique classique et quantique. L'utilisation que Claude Shannon (1916 -2001) fait de cette quantité abstraite dans sa théorie de l'information et le concept de « néguentropie » que Léon Brillouin (1889-1969) introduit dans les années 1950 achève de compliquer et d'embrouiller le débat.

Or, cette « révolution probabiliste » hyper abstraite de l'entropie n'aide pas à porter le regard vers les conséquences fondamentales, pour les êtres humains sur la face de la Terre, dans le Cosmos et au sein de la Biosphère,

du fait de soudainement brûler – et donc de dégrader – des stocks colossaux d'énergies fossiles puisés sous la croûte terrestre. ■

1) Albert Einstein–Michele Besso, *Correspondance 1903-1955*, Hermann, Paris, 1972. Voir la lettre d'Einstein du 29 juillet 1953.

2) La mécanique (ou thermodynamique) statistique interprète l'entropie comme la mesure du degré de désordre d'un système au niveau microscopique.

BIBLIOGRAPHIE

GRINEVALD J. *Energie et civilisation : de Vitruve à Carnot et retour*, Université de Paris-X-Nanterre, 1979, inédit.

POUR ALLER PLUS LOIN

ATKINS PW. *Chaleur et désordre : le deuxième principe de la thermodynamique*, Pour la Science-Belin, Paris, 1987.

GRINEVALD J. *La Biosphère de l'Anthropocène. Repères transdisciplinaires (1824-2007)*, Georg, Genève, 2007 (2^e éd. révisée et augmentée, à paraître).

LOCQUENEUX R. *Histoire de la thermodynamique classique. De Sadi Carnot à Gibbs*, Belin, Paris, 2009.