

Le principe de Carnot

BENOIT CHALIFOUX

Tout le monde connaît le célèbre second principe de la thermodynamique, présenté depuis Clausius comme annonçant la mort thermique de l'Univers. Lorsque nous revenons aux textes de Sadi Carnot, l'auteur original de ce principe, nous réalisons que ses travaux, même s'ils allaient en effet donner naissance à une science nouvelle – la thermodynamique –, ne permettaient en aucun cas de dégager un verdict aussi sombre.

Beaucoup de scientifiques en sont venus, au xx^e siècle, à considérer la thermodynamique comme la reine des sciences. Depuis les remarques, apparemment sans conséquences, publiées en 1824 par Sadi Carnot au sujet des machines thermiques jusqu'aux énoncés philosophiques de nos penseurs contemporains, les scientifiques semblent avoir défriché, par l'intermédiaire de la thermodynamique, une voie privilégiée permettant de lier intimement la destinée humaine au devenir de l'Univers dans son ensemble.

Il s'agit là sans aucun doute d'un tour de force extraordinaire. Mais au-delà de ce que nous permet d'accomplir la thermodynamique, il semble que l'air du temps, en l'occurrence le pessimisme philosophique des Lumières puis celui des Romantiques, ait réussi à prendre les commandes et à nous conduire vers une destination que nous n'avions pas anticipée.

Tous les étudiants ont vu un jour leurs professeurs de thermodynamique annoncer, avec une ferveur quasi religieuse, l'apocalypse d'une mort thermique généralisée devant frapper tôt ou tard notre Univers. Le discours ressemble la plupart du temps à cette citation du physicien Norbert Wiener, tirée de son livre *Cybernétique et société*¹ : « Nous nageons à contre-courant dans un vaste torrent de désorganisation qui tend à réduire toute chose à cet état de mort thermique, d'équilibre et d'uniformité qu'exprime la seconde loi de la thermodynamique. [...] Nous ne combattons pas pour une victoire définitive dans un avenir indéfini. La plus grande victoire possible consiste à être, à continuer d'être et à avoir été. Aucune défaite ne peut nous enlever le succès d'avoir existé pendant un

certain moment, dans un Univers qui nous semble indifférent. [...] Nous pouvons pourtant réussir à édifier nos valeurs de façon telle que ces accidents temporaires que sont l'existence vivante et le vie humaine soient considérées comme des valeurs positives souverainement importantes en dépit de leur caractère fugitif. »

Non seulement sommes-nous tous condamnés à mort, ce qui n'est sans doute pas nouveau, mais l'humanité devra elle-même un jour périr ainsi que notre Univers tout entier. Cet arrêt de mort, prononcé sous le vocable de « second principe de la thermodynamique », trouve son origine dans les travaux de Rudolph Clausius et de lord Kelvin, qui prétendent l'avoir fait « dériver » du principe de Carnot au cours de la période 1848-1865.

Sadi Carnot n'avait pourtant pas la prétention d'écrire un essai philosophique fracassant sur la destinée de l'homme et de l'Univers. Nous pouvons néanmoins distinguer, au-delà des préoccupations tout à fait pragmatiques d'un ingénieur, une vision autrement plus optimiste que celle promulguée par Clausius, Kelvin, Wiener et leurs successeurs. Carnot écrit, dans son célèbre essai de 1824, *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*² :

« C'est à la chaleur que doivent être attribués les grands mouvements qui frappent nos regards sur la terre ; c'est à elle que sont dues les agitations de l'atmosphère, l'ascension des nuages, la chute des pluies et des autres météores, les courants d'eau qui sillonnent la surface du globe et dont l'homme est parvenu à employer pour son usage une faible partie ; enfin les tremblements de terre, les éruptions volcaniques, reconnaissent aussi pour cause la chaleur.

« C'est dans cet immense réservoir



Sadi Carnot (1796-1832) est le fils de l'illustre Lazare Carnot, l'« organisateur de la victoire » au moment des guerres qui ont suivi la Révolution. En 1797, à la suite des événements de fructidor, son père, alors membre du Directoire, dut s'exiler et emmener Sadi âgé à peine d'un an.

Sadi exprima une curiosité précoce pour tout ce qui a trait à la mécanique. Son père, qui se chargeait lui-même de son éducation, décida de l'orienter vers les sciences. Sadi fut admis à l'Ecole polytechnique dès l'âge de 16 ans, puis à l'Ecole de génie de Metz deux années plus tard. Après quelques années de missions dans les forteresses de France, il réussit à intégrer le nouveau corps d'Etat-major, avec le grade de lieutenant, puis fut mis en disponibilité à sa demande.

Cette situation devait lui permettre, de 1819 jusqu'à sa mort en 1832, de regagner Paris et de se consacrer à une vie studieuse. Il put ainsi assister à une multitude de cours, dont ceux du Conservatoire des arts et métiers, du Collège de France, de la Sorbonne et d'autres.

Républicain dans l'âme, Carnot fut contraint, dans le contexte de la Restauration, d'adopter un mode de vie plutôt discret, loin des trafics d'influence dominant les institutions officielles. Ses *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*, publiées en 1824 à titre privé et sans aucun patronage, sont considérées aujourd'hui comme l'un des textes fondateurs de la thermodynamique.

Même si Carnot voulait que son livre puisse être lu et compris par des lecteurs de tous horizons, celui-ci passa presque inaperçu dans les milieux scientifiques de l'époque. Il s'agissait d'un texte simple, sans appareillage mathématique compliqué, qui contenait toutefois plusieurs propositions importantes dont celle liant la production de travail à une nécessaire chute de température. L'ingénieur des Mines Emile Clapeyron fut le premier à s'y référer dans un mémoire publié en 1834 dans le *Journal de l'Ecole royale polytechnique*. Par la suite, lord Kelvin et Rudolph Clausius firent de l'ouvrage de Carnot un texte incontournable de la thermodynamique.

Plusieurs notes publiées à titre posthume montrent que Carnot, s'il n'était pas décédé prématurément, aurait joué un rôle beaucoup plus déterminant dans la naissance de cette science nouvelle, en raison du caractère précoce de ses observations.

que nous pouvons puiser la force motrice nécessaire à nos besoins ; la nature, en nous offrant de toute part le combustible, nous a donné la faculté de faire naître en tous temps et en tous lieux la chaleur et la puissance motrice qui en est la suite. Développer cette puissance, l'approprier à notre usage, tel est l'objet des machines à feu. »

Les machines à feu « paraissent destinées à produire une grande révolution dans le monde civilisé. Si quelque jour les perfectionnements de la machine à feu s'étendent assez loin pour la rendre peu coûteuse en établissement et en combustible, elle réunira toutes les qualités désirables, et fera prendre aux arts industriels un essor dont il sera difficile de prévoir toute l'étendue. »

Il y a donc eu sans conteste un dérapage philosophique important depuis les conceptions originales de Carnot. Après que Clausius eût introduit le concept d'entropie dans la thermodynamique, Boltzmann et Gibbs l'ont assimilé à la notion de probabilité puis à celle d'un désordre toujours croissant dans notre Univers. Cela nous a finalement conduit aux conceptions de Wiener, le père de la cybernétique ou la théorie de l'information, définie par lui comme étant le seul moyen dont dispose l'homme pour combattre, *a posteriori*, l'entropie.

L'approche de Carnot

Carnot avait, en tant qu'ingénieur, une approche d'économiste, dans le sens de l'économie physique, comme le montre le titre même de son opuscule *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*. Cela signifie que la science et toute découverte qui en découle sont soumises à la nécessité du développement, par l'homme, des moyens lui permettant d'améliorer sa condition. Pour Carnot, il n'y a pas de « réalité mathématique objective » qui viendrait se superposer à l'Univers. Beaucoup de commentateurs se sont d'ailleurs plaints de l'absence d'appareillage mathématique sophistiqué dans ses *Réflexions*. En effet, son approche reposait sur l'économie physique, à l'opposé de la physique mathématique.



↳ Pour Carnot, de même que pour ses prédécesseurs, comme son père Lazare Carnot, Jean-Baptiste Colbert et Gottfried Leibniz, l'économie est l'étude du développement des « *arts industriels* ». Au centre de leurs préoccupations se trouvaient la conception de machines, comme ce fut le cas par ailleurs pour Léonard de Vinci, puis ensuite les processus thermiques et les mouvements liés à la chaleur, et enfin l'économie physique qui allait permettre de maîtriser ces processus et de les mettre au service de l'homme.

Cette approche, qualifiée par les « élites » de la science actuelle de « pragmatique » et « subjective », a pourtant permis à Carnot de poser les principes les plus généraux et les plus profonds, car le meilleur moyen de comprendre la réalité de l'Univers est de commencer par l'homme et son action transformatrice dans la nature.

Les observations de Carnot

Depuis la première machine construite par Denis Papin jusqu'aux nombreux perfectionnements, souvent révolutionnaires, apportés par James Watts, les machines à feu avaient déjà, à l'époque de Carnot, été mises à contribution dans de nombreux domaines d'activité. Toutefois, Carnot estimait que « *le phénomène de la production du mouvement par la chaleur n'[avait] pas été considéré sous un point de vue assez général* ». Ainsi cherchait-il, au-delà des perfectionnements techniques, à élaborer une théorie complète reposant sur des lois de la physique « *assez étendues, assez généralisées, pour faire connaître à l'avance tous les effets de la chaleur agissant d'une manière déterminée sur un corps quelconque* ».

C'est dans ce contexte qu'il essaya d'imaginer une machine indépendante de tout mécanisme particulier, une machine idéale. Examinons la **figure 1**, adaptée du dessin que nous a fourni Carnot dans ses *Réflexions*. Ce dessin décrit le cycle thermodynamique complet d'une machine idéale simple, formée d'un piston qui monte et qui descend, au rythme des processus de dilatation

et de condensation de l'agent qu'il contient, de l'air ou de la vapeur d'eau par exemple. On peut bien sûr imaginer que ce piston puisse, par la suite, être relié à un mécanisme capable de convertir ce mouvement de va-et-vient vertical en d'autres formes de mouvement. Mais concentrons-nous sur le mouvement du piston proprement dit : on y distingue quatre étapes.

1. Lorsque notre machine est mise en contact avec une source de chaleur de température A, l'agent situé sous le piston se dilate, toujours à une température constante (le piston passe de la position cd à la position ef sur la **figure 1a**). Il y a, dans ce cas, un apport de chaleur et le mouvement du piston produit en même temps un travail.

2. Lorsque nous éloignons notre machine de la source de chaleur, l'agent continue à se dilater pendant que sa température baisse, disons jusqu'à B (cela correspond au passage de la position ef à la position gh sur la **figure 1a**). Ici, aucune chaleur n'est fournie ni cédée. Le piston continue par ailleurs à fournir un travail supplémentaire.

3. Lorsque nous mettons notre machine en contact avec un corps froid de température B (c'est-à-dire à la même température que l'agent) et que nous baissions en même temps le piston (de la position gh à cd sur la **figure 1b**), l'agent qu'il contient est comprimé, alors que sa température reste constante : il cède de la chaleur. Remarquons par ailleurs que nous exerçons sur le piston un travail.

4. Lorsque nous isolons de nouveau notre machine en retirant le corps B et que nous continuons à baisser le piston (de la position cd à ij sur la **figure 1b**), l'agent est comprimé pendant que sa température s'accroît, pour revenir à la température A. Aucune chaleur n'est cédée ni fournie et un travail supplémentaire est exercé sur le piston. Nous pouvons ensuite répéter le cycle à partir de la première étape, et ainsi de suite.

Nous constatons en premier lieu que le travail total produit par le piston est plus grand que le travail que nous avons exercé sur lui, puisque le processus de dilatation, pendant lequel le travail est produit, se fait à une température plus élevée que le processus de compression. Nous constatons ensuite que pour ra-

mener le piston à son état initial, il faut absolument lui faire subir un travail, et pour cela l'agent qu'il contient doit pouvoir céder son excédent de chaleur. Cela signifie qu'en dernière analyse la chaleur passe du corps A au corps B, de température moins élevée. Soulignons que la température de chacun de ses deux corps est en tout temps maintenue constante. C'est ce qui amena Carnot à conclure qu'il doit y avoir, en toutes circonstances, une « *chute dans le calorique* », la substance véhiculant la chaleur, faisant ainsi l'analogie avec le rôle d'une chute d'eau dans le fonctionnement d'un moulin : « *D'après ce principe, il ne suffit pas, pour donner naissance à la puissance motrice, de se procurer de la chaleur. Il faut encore se procurer du froid ; sans lui, la chaleur serait inutile.* »

Carnot a ensuite réalisé qu'une chute dans le calorique pouvait non seulement produire un travail mais qu'un travail pouvait, à l'inverse, provoquer une chute dans le calorique : « *Partout où il existe une différence de température, il peut y avoir production de puissance motrice. Réciproquement, partout où l'on peut consommer de cette puissance, il est possible de faire naître une différence de température, il est possible d'occasionner une rupture d'équilibre dans le calorique.* »

Il a ensuite démontré que le rendement maximal d'une machine, entre deux températures données, ne dépend pas de la nature de l'agent que nous plaçons sous le piston mais de notre capacité à éviter le gaspillage : « *La puissance motrice de la chaleur est indépendante des agents mis en œuvre pour la réaliser ; sa quantité est fixée uniquement par les températures des corps entre lesquels se fait en dernier résultat le transport du calorique.* » Nous pouvons éviter le gaspillage si nous réduisons le frottement ou « *[s'il ne se fait dans les corps aucun changement de température qui ne soit dû à un changement de volume, ou, ce qui est la même chose autrement exprimée, s'il n'y a jamais de contact entre des corps de températures sensiblement différentes]* ».

L'idée la plus fructueuse de Carnot, celle qui est à l'origine de tout le débat dont nous avons hérité aujourd'hui, a été sans aucun doute d'imaginer ce qui arriverait si l'on faisait marcher la machine à l'envers :

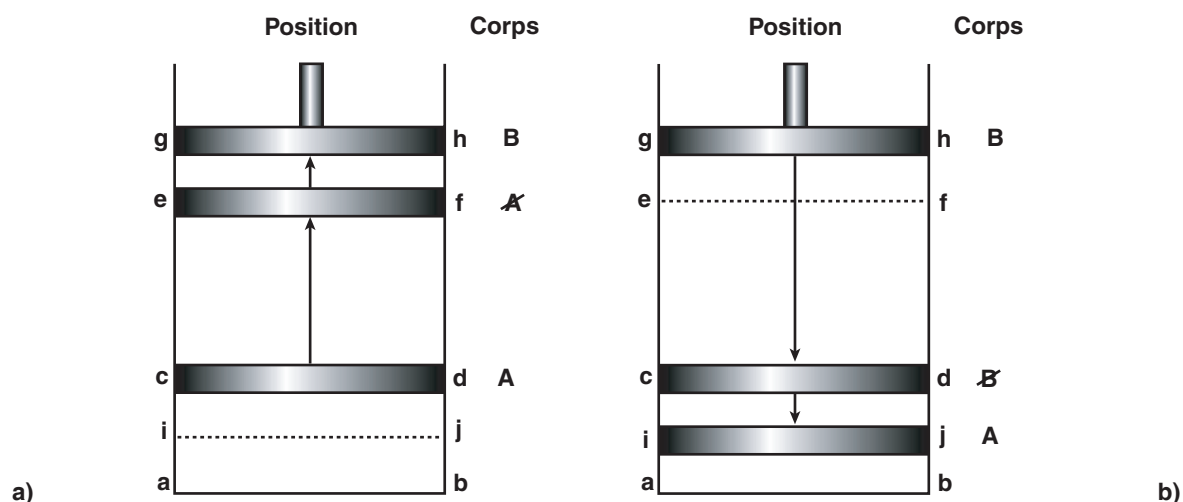


Figure 1. a) Piston pendant la dillatation, b) piston pendant la compression.

« Or, s'il existait des moyens d'employer la chaleur à ceux dont nous avons fait usage, c'est-à-dire s'il était possible, par quelque méthode que ce fût, de faire produire au calorique une quantité de puissance motrice plus grande que nous l'avons fait par notre première série d'opérations, il suffirait de distraire une portion de cette puissance pour faire remonter, par la méthode qui vient d'être indiquée [en faisant fonctionner la machine à l'envers, NdA], le calorique du corps B au corps A, du réfrigérant au foyer, pour rétablir les choses dans leur état primitif et se mettre par là en mesure de recommencer une opération entièrement semblable à la première, et ainsi de suite : ce serait là, non seulement le mouvement perpétuel, mais une création indéfinie de force motrice sans consommation ni de calorique ni de quelque autre agent que ce soit. Une semblable création est tout à fait contraire aux idées reçues jusqu'à présent, aux lois de la mécanique et de la saine physique ; elle est inadmissible. »

C'est de ce passage que provient le célèbre concept de réversibilité. Pour qu'un cycle soit réversible, il faut bien sûr que notre piston et que tous les mécanismes qui pourraient lui être associés pour effectuer un travail quelconque soient exempts de toute friction, mais il faut aussi que le passage de la chaleur entre le corps A et le piston, puis le piston et

le corps B, se fasse à un moment où les températures sont égales. Ainsi, il faut prendre garde, lorsque le piston se trouve aux positions gh et ij, par exemple, de ne pas le mettre en contact avec les corps B et A ni trop rapidement ni trop tard. Il faut s'assurer qu'il n'y ait « jamais de contact entre des corps de températures sensiblement différentes », comme Carnot l'affirme dans le passage que nous avons cité un peu plus haut. Cette remarque, qui nous fait penser aux réflexions de Lazare Carnot sur le « mouvement géométrique » des machines, vise à rendre le mouvement du piston aussi « doux » et idéal que possible, condition nécessaire à la réversibilité du cycle.³ Insistons cependant sur le fait que la réversibilité du cycle ne nous permet pas de développer le mouvement perpétuel mais seulement de maximiser le travail que nous pouvons tirer d'une source d'énergie donnée.

Les travaux de Clausius

Rudolph Clausius, dans un célèbre mémoire⁴ publié en 1850, distingua quant à lui deux types de transformations : « Dans tous les cas où une quantité de chaleur se transforme en travail, et où le corps qui opère cette transformation revient finalement à son état initial, il faut en même temps

qu'une quantité de chaleur passe d'un corps chaud à un corps froid ; et le rapport de cette dernière quantité de chaleur à la première ne dépend que des températures des deux corps entre lesquels son passage s'effectue, et non de la nature de la matière médiatrice. »

Le premier type de transformations est la transformation proprement dite de la chaleur en travail, qu'il baptisa « transformation de première espèce ». Carnot ne pensait pas, lorsqu'il écrivit ses *Réflexions*, que la chaleur puisse être consommée, ou transformée en travail. Comme tous les scientifiques de son époque, il s'était rangé à la théorie du calorique pour expliquer la nature de la chaleur.⁵

C'est toutefois l'idée, exprimée dans ses *Réflexions*, selon laquelle le travail est le résultat d'une chute dans le calorique, d'où la nécessité d'une différence de température, qui allait attirer l'attention de Clausius. Il baptisa ce processus de transfert de la chaleur « transformation de deuxième espèce » : pour que le travail généré par la chaleur en partie consommée soit utile, il faut pouvoir fermer le cycle et le répéter. Il faut donc qu'une quantité quelconque de chaleur puisse passer d'un corps chaud à un corps froid.

Clausius montra ensuite qu'il existe une relation précise entre le travail produit par la destruction

↗ d'une partie de la chaleur et le passage de la chaleur d'un corps chaud à un corps froid :

$$\frac{\text{travail produit}}{\text{chaleur transmise}} = \frac{dt}{A(a+t)}$$

où A et a sont des constantes et t la température.

Reprenant ensuite le concept de réversibilité, il a montré qu'un cycle n'était réversible que si, après l'avoir fait fonctionner à l'endroit puis à l'envers, toutes les transformations (de première et de deuxième espèces) se compensaient.

Le problème qui en découle réside dans le fait que, dans la nature, la plupart des cycles sont irréversibles. D'une part, il y a souvent des passages de la chaleur d'un corps chaud à un corps froid sans qu'aucune quantité de travail utile ne soit produite. C'est le cas pour la conduction, le rayonnement calorique et la friction. D'autre part, il n'y a jamais de passage de la chaleur d'un corps froid à un corps chaud sans qu'il n'y ait un travail consommé. C'est ce que Clausius exprime dans son axiome : « *Il ne peut jamais passer de chaleur d'un corps froid à un corps plus chaud, à moins qu'il ne se présente en même temps une autre modification qui dépende de la première.* »

Clausius a défini, à partir de cette observation, le concept d'équivalence des transformations puis celui d'entropie. Imaginons un système composé de plusieurs cycles, certains fonctionnant à l'endroit, d'autres à l'envers, et peut-être même à l'endroit puis à l'envers ou vice versa. Si tous les cycles sont réversibles, toutes les transformations, qu'elles soient de première ou de deuxième espèces, sont compensées en raison de leur équivalence ultime. Nous concluons donc qu'il y a quelque chose qui ne change pas. C'est ce quelque chose que Clausius a appelé l'« entropie ». Il en découle que s'il existe dans notre système au moins un cycle qui n'est pas réversible, alors l'entropie change. Clausius a montré que ce changement allait toujours dans la même direction, à laquelle il a assignée en l'occurrence le signe positif. Ainsi, lorsque nous considérons un système dans sa globalité, l'entropie ne peut, lorsqu'elle change, que s'accroître mais elle ne peut jamais diminuer.

Clausius a décidé plus tard d'universaliser ce principe, affirmant que

« *l'entropie de l'Univers va constamment en augmentant* », comme si l'Univers était une machine. Carnot en aurait tout simplement déduit que « *cet immense réservoir de chaleur* » (pour reprendre son expression), si l'on devait un jour en atteindre les limites, serait éventuellement remplacé par autre chose, grâce au développement d'un nouveau principe moteur. La plupart des scientifiques toutefois en sont venus à assimiler l'entropie à la disparition graduelle des différentiels de température au sein de l'Univers. D'où l'idée que si un jour il n'y avait plus de différentiels de température dans l'Univers, tout travail utile deviendrait impossible.

C'est ici que se situe précisément le dérapage philosophique dont nous avons parlé au début. Depuis Clausius, la grande majorité des scientifiques ont adopté, en raison de leur approche mécaniste, ce point de vue pessimiste sur l'avenir de l'homme et de l'Univers. Les travaux de Boltzmann sur la cinétique des gaz sont à cet égard particulièrement révélateurs.

Boltzmann fut le premier, dans ses *Leçons sur la théorie des gaz* (publiées en français en 1905), à introduire les méthodes statistiques en physique : son objectif était de réconcilier la mécanique, en la rendant un peu indéterministe, avec le concept d'irréversibilité car il pensait, à tort, que le concept d'entropie de Clausius (parce qu'il découlait de l'irréversibilité) était incompatible avec la mécanique. On avait en effet estimé jusque-là que les processus mécaniques, par le fait qu'on les souhaitait soumis à une forme ou une autre de « déterminisme mathématique », devaient être parfaitement réversibles.

Selon sa théorie, la température d'un gaz dépend de la vitesse moyenne des particules qu'il contient. Toutefois, les particules se déplacent à des vitesses différentes et ont des parcours de longueurs différentes entre les chocs qu'elles subissent. Si l'on pouvait trier, comme Maxwell l'avait proposé avec ses démons miniatures, les particules en fonction de leur vitesse, et cela sans leur faire subir un quelconque travail, on pourrait rétablir la différence de température entre deux corps et donc le différentiel nécessaire à la production d'un travail utile pour

l'homme. Cependant, la plupart des scientifiques s'accordent pour dire que cela est impossible. Boltzmann ne niait pas, quant à lui, la possibilité de voir surgir naturellement, c'est-à-dire sans intervention humaine, au sein d'un gaz ou de l'Univers dans son ensemble, un processus de triage, mais il estimait que ce serait de plus en plus improbable, alors que l'homogénéité deviendrait au contraire de plus en plus probable.

Il n'avait toutefois pas pensé que l'on pourrait produire un jour de l'énergie, non pas en triant ses particules mais en les faisant tout simplement exploser comme nous le faisons aujourd'hui avec la fission nucléaire !

Rétablir la place de l'homme

Il ne faut pas oublier que le raisonnement de Clausius était fondé, quoi qu'on en dise, sur le fonctionnement des machines, et que celles-ci étaient constituées de cycles fermés. C'était là la condition nécessaire pour produire du travail utile à l'homme. N'oublions pas non plus que les machines dont nous parlons sont, pour paraphraser Lincoln, des produits de l'homme, opérées par l'homme et pour l'homme.

Il y a, par contre, une question fondamentale que Clausius et ses successeurs n'ont pas su poser : lorsque l'homme capte de l'énergie dans l'Univers pour produire un travail utile, n'y aurait-il pas, quelque part, une compensation, ou une « transformation équivalente », que nous aurions oubliée ?

Eh bien si ! L'économie humaine se trouve transformée de façon à soutenir un plus grand nombre d'hommes et de femmes, une forme d'existence supérieure dans l'Univers. Cette transformation peut être mesurée par l'augmentation du potentiel de densité démographique sur un territoire donné, un territoire qui peut être étendu, en définitive, à tout l'Univers. Ainsi, s'il est vrai qu'il n'y a pas de mouvement mécanique perpétuel dans l'Univers, nous devons toutefois reconnaître que ce dernier évolue. C'est peut-être là le message central de la thermodynamique, si message universel il

y a, nous permettant finalement de donner une direction au temps.⁶

Carnot a rejeté la possibilité du mouvement perpétuel mais il n'en a pas tiré la conclusion que l'Univers allait mourir. Nous pouvons tout simplement en conclure que l'homme ne peut pas compter, pour son développement, sur une forme unique de puissance motrice. Il lui faudra tôt ou tard trouver autre chose, et cela dépendra de sa créativité, de sa capacité à découvrir de nouvelles lois de l'Univers et à en tirer de nouvelles formes de puissance motrice. D'ailleurs, même si cet « immense réservoir de chaleur » dont parlait Carnot ne finissait jamais par s'épuiser en termes absolus, en termes économiques il en est autrement car il arrive toujours un moment où les coûts d'exploitation, les coûts sociaux associés à l'exploitation, deviennent trop élevés même s'il y reste encore des ressources importantes.

Nous sommes donc toujours à la recherche de nouveaux principes moteurs, avec les réservoirs d'énergie qui leurs sont associés et ce processus, qui est lié à la créativité humaine, ne s'épuise jamais.

Le Monde selon Platon

Il peut être utile d'aborder cette question d'un point de vue philosophique car ce débat sur le développement de l'homme et de l'Univers n'est pas nouveau ; il remonte aux origines de la philosophie occidentale. Déjà, Platon apportait une réponse satisfaisante à ce problème. Il rejetait, d'une part, toute dichotomie entre le progrès de la condition humaine et celui de l'Univers. En ce qui concerne l'Univers proprement dit, il affirme dans son célèbre *Timée*⁷ : « Il est une autre question qu'il faut examiner à propos de l'Univers, à savoir d'après lequel des deux modèles son architecte l'a construit, d'après le modèle immuable et toujours le même, ou d'après celui qui est né. Or, si le monde est beau et son auteur excellent, il est évident qu'il a eu les yeux sur le modèle éternel. [...] »

« Le dieu, en effet, voulant que tout fût bon et que rien ne fût mauvais,

autant que cela est possible, prit toute la masse des choses visibles, qui n'était pas en repos, mais se mouvait sans règle et sans ordre et la fit passer du désordre à l'ordre, estimant que l'ordre était préférable à tous égards. »

Donc, pour Platon, l'Univers est en mouvement, et celui-ci se fait dans une direction déterminée qu'il décrit comme le passage du « désordre à l'ordre ». Toutefois, cette progression ne doit en aucun cas être assimilée à un simple processus mécanique : « Ayant donc réfléchi, il s'aperçut que des choses visibles par nature il ne pourrait jamais sortir un tout privé d'intelligence qui fût plus beau qu'un tout intelligent, et, en outre, que dans aucun être il ne pouvait y avoir d'intelligence sans âme. En conséquence, il mit l'intelligence dans l'âme, et l'âme dans le corps, et il construisit l'Univers de manière à en faire une œuvre qui fût naturellement la plus belle possible et la meilleure. »

S'il est vrai par ailleurs que quelque chose se perd dans l'Univers, quelque chose se crée aussi : Platon affirme en effet que « l'art de son auteur l'a fait tel qu'il se nourrit de sa propre perte et que c'est en lui-même et par lui-même que se produisent toutes ses affections et ses actions. Celui qui l'a composé a pensé qu'il serait meilleur, s'il se suffisait à lui-même, que s'il avait besoin d'autre chose. »

Clausius avait probablement raison de dire qu'au final les transformations ne sont pas « équivalentes », mais cette situation est-elle aussi dramatique qu'il le croit ? Ce que nous percevons comme l'entropie ne serait finalement que la marche du temps, une mesure de la progression de l'Univers. Nous pourrions, avec l'aide de Platon, résumer le problème comme suit. Nous aurions ainsi : le créé → le modèle ; l'imperfection → la perfection ; moins d'ordre → davantage d'ordre ; davantage de mouvement → moins de mouvement ; ce qui devient et n'est pas → ce qui est et ne devient pas.

Notre Univers n'est pas un système mécanique. Il a quelque chose de vivant, il est doté d'une âme et l'homme y trouve une place primordiale. En fait, sans tomber dans le vitalisme et conclure que l'Univers est vivant en tant que tel, nous pouvons au moins affirmer qu'il n'y a pas de raison de

supposer que les lois qui régissent le développement de la condition et de la conscience humaines soient en contradiction avec celles qui régissent le développement de l'Univers proprement dit. Les ressources de la créativité humaine et celles de l'Univers sont en effet toutes deux inépuisables, et le progrès de l'une peut être une mesure du progrès de l'autre. ■

Notes

1. Norbert Wiener, *Cybernétique et société, l'usage humain des êtres humains*, Deux-Rives, Paris, 1952.

2. Sadi Carnot, *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*, Nouvelle édition augmentée des *Notes sur les Mathématiques, la Physique et autres sujets*, Librairie scientifique et technique A. Blanchard, Paris, 1953.

3. Pour mieux comprendre l'influence qu'a exercé Lazare Carnot sur la pensée de son fils voir Charles Gillespie, « The Scientific work of Lazare Carnot, and its influence on that of his son », in *Sadi Carnot et l'essor de la thermodynamique, Table ronde du Centre national de la recherche scientifique et de l'École polytechnique, 11-13 juin 1974, Paris*, Editions du CNRS, Paris, 1976.

Pour en savoir plus en ce qui concerne les travaux de Lazare Carnot sur les machines, voir l'article de Dino De Paoli, « La théorie de la technologie de Lazare Carnot, base de l'économie physique », *Nouvelle Solidarité*, 12 mars 1999.

4. Rudolph Clausius, *Théorie mécanique de la chaleur*, Paris, E. Lacroix, 1868-1869.

5. Des notes publiées à titre posthume (mais écrites avant 1832, année de son décès) montrent cependant qu'il avait changé d'avis, et qu'il était arrivé à la conclusion que « la chaleur est le résultat d'un mouvement ». Il avait de plus calculé que « la production d'une unité de puissance motrice nécessitait la destruction de 2,70 unités de chaleur ». En termes modernes, une unité de chaleur produirait 370 kilogrammètres de travail, ce qui est proche de la valeur calculée par Joule (425 kilogrammètres) plus d'une décennie plus tard.

6. Pour mieux comprendre le lien entre la thermodynamique et la «èche du temps », ainsi que les limites de ce concept, voir l'article de Dino De Paoli, « Une réflexion sur la pensée-Prigogine, le temps précède-t-il réellement l'existence ? », *Fusion*, n°80, mars-avril 2000.

7. Platon, *Timée*, traduction par Emile Chambry, Garnier Flammarion, 1969.