

1974-1

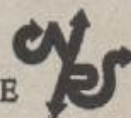
TABLE RONDE
DU
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

SADI CARNOT
ET
L'ESSOR DE LA THERMODYNAMIQUE

Paris
Ecole Polytechnique
11 - 13 juin 1974

EXTRAIT

CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



RÉCENTS PROGRÈS DANS L'ANALYSE DE L'IRRÉVERSIBILITÉ PHYSIQUE ⁽¹⁾

O. COSTA DE BEAUREGARD

Voici longtemps que la sagacité des théoriciens de la Physique, éventuellement mués en philosophes des sciences, s'acharne à toucher exactement le noeud d'un mystère assez irritant situé au coeur du problème de l'irréversibilité physique. Poincaré, par exemple, fait observer que si l'on retournait la flèche du principe de Carnot, que si la chaleur s'écoulait des sources froides vers les sources chaudes, et que si la viscosité était accélératrice au lieu d'être retardatrice, toute prévision deviendrait impossible : il serait dangereux de prendre un bain tiède, parce qu'on ne saurait jamais quel bout va geler et quel bout va bouillir, et dangereux de jouer aux boules, parce que les mobiles sortiraient d'eux-mêmes du repos dans une direction et avec une vitesse imprévisibles. L'hypothétique univers anti-Carnot, écrit Poincaré, "serait un univers sans lois". Le point crucial est que dans notre univers familier, soumis au principe de Carnot, la prévision physique est possible tandis que la rétrodiction *à partir des données du présent* ne l'est pas : impossible de "rétrodire" sur quel carré était concentrée la poudre à présent répartie sur tout l'échiquier, ou de décrire en détail (faute de l'avoir observé) l'événement qui a donné naissance à l'essaim quasi-homogène des petites planètes. Dans le paradoxal cosmos anti-Carnot c'est au contraire la rétrodiction qui serait infaillible et la prédiction qui serait impossible. La conclusion de Poincaré doit donc être précisée en énonçant que notre univers physique familier est un univers à lois causales, tandis que le paradoxal cosmos anti-Carnot serait un cosmos à lois finales.

Lorsque la Mécanique Statistique fut appliquée par Boltzmann à une déduction probabiliste du principe de Carnot, de pénétrants esprits s'avisèrent du paradoxe qu'il y a à déduire l'irréversibilité physique d'une théorie — la Mécanique Rationnelle — qui est de soi symétrique entre avenir et passé. C'est ainsi qu'apparurent les célèbres "paradoxes" de Loschmidt et de Zermelo. Si "à un instant t l'on retourne exactement les vitesses" de toutes les molécules d'un gaz, celui-ci retraversera en sens opposé tous ses

(1) Cette mise au point reprend pour l'essentiel, mais en l'améliorant, celle parue in Gauthier-Villars, *Mises à Jour*, 1969, 4, p. 161-172.

précédents états, en sorte que, si l'entropie de ce gaz croissait dans son évolution "naturelle", elle décroîtra dans son évolution retournée, et que par conséquent il doit y avoir exactement autant d'évolutions à entropie croissante que d'évolutions à entropie décroissante (Loschmidt). Par ailleurs, d'après le "théorème du retour" de Poincaré, tout système isolé à nombre de degrés de liberté fini repassera (et a passé) une infinité de fois arbitrairement près de toute configuration qu'il a une fois traversée, et ceci est vrai notamment des états de faible probabilité (Zermelo).

La "réfutation" de ces paradoxes a fait couler — en vain — des flots d'encre, de la part d'esprits aussi éminents que Boltzmann, Poincaré, Borel, P. et T. Ehrenfest, et d'autres encore. Ces commentaires ont mis en évidence certains à-côtés intéressants du problème : interaction "initiale" du système avec un système plus vaste, comme dans la genèse de l'essaim des petites planètes par l'explosion d'une grosse planète ; inévitable interaction faible de tout système soi-disant isolé avec le reste du cosmos (ne serait-ce que du fait de la gravitation universelle) ; inévitable interaction du système avec l'appareil de mesure au moment d'une observation ; caractère "retardé" des interactions à distance, qui obligerait à postuler des actions avancées dans le retournement à la Loschmidt ; etc. C'est seulement dans ces dernières années que plusieurs physiciens et philosophes des sciences sont indépendamment parvenus à caractériser le noeud du problème et à montrer clairement de quelle manière il est noué.

La remarque significative est que la racine commune aux paradoxes de Loschmidt et de Zermelo est un "paradoxe" analogue inhérent au Calcul des Probabilités lui-même, et que voici : comment se fait-il que, *même si les probabilités intrinsèques de transition entre deux états d'un système sont symétriques* (comme par exemple dans le battage des cartes, ou dans le passage d'un grain de poudre d'une case à une autre d'un échiquier, ou dans la transition "de désintégration" d'un noyau radioactif) *le fait est* que les évolutions physiques macroscopiques se fassent toujours des complexions de basse probabilité vers celles de haute probabilité, et non dans l'autre sens ? C'est là *un fait* incontestable : personne ne compte sur le battage des cartes pour mettre le jeu en ordre (quel que soit d'ailleurs cet "ordre", défini comme un sous-ensemble de l'ensemble des permutations possibles), ni sur une agitation *quelconque* de l'échiquier pour rassembler sur une case *donnée* la poudre qu'il porte, ni sur les transitions quantiques pour synthétiser, dans l'espace illimité, les noyaux radioactifs à partir de leurs éléments. Ici nous devons écarter une réponse fallacieuse qui serait la suivante : dans tout système statistique il y a des fluctuations de part et d'autre de l'état d'équilibre, en sorte que, par exemple, si des noyaux radioactifs et leurs produits de désintégration sont enfermés dans une enceinte rigoureusement étanche, il y aura constamment des désintégrations et des synthèses, et, qui plus est, des fluctuations autour de l'état d'équilibre. C'est là le ressort de la célèbre analyse des Ehrenfest, mais ce n'est décidément *pas* la solution de notre problème. Ce dont nous parlons, c'est de *l'absence de grandes fluctuations improbables se produisant à point nommé* : l'on peut "se donner à un instant initial $t = 0$ " une collection de noyaux radioactifs et observer, dans l'espace euclidien illimité, leur désintégration suivant la loi bien connue $n = n_0 \exp(-at)$; mais on ne peut pas faire en sorte de "cueillir à un instant final $t = 0$ " une collection de noyaux radioactifs synthétisés à partir de leurs éléments suivant la loi $n = n_0 \exp(+at)$. Pourtant, si l'on se donne, à l'instant 0, n noyaux radioactifs dans l'espace euclidien illimité, le calcul des probabilités *appliqué "aveuglément"* (Watanabé) *en rétrodiction* conduit à la loi

$n = n_0 \exp(+at)$ – exactement comme il conduit à la loi $n = n_0 \exp(-at)$ lorsqu'il est appliqué "aveuglement" en prédiction. C'est là que git le paradoxe : *comment se fait-il qu'en Physique l'usage "prédictif aveugle" du Calcul des Probabilités soit infallible, alors que son usage "rétrodictif aveugle" serait manifestement absurde ?* Autre exemple : un physicien dépose avec une pipette une goutte d'encre au sein d'un verre d'eau : le calcul *prédictif* montre, et l'expérience vérifie, qu'à partir de l'instant initial la goutte diffuse au sein de l'eau jusqu'à former un mélange homogène. Si le système était rigoureusement isolé (ce qui signifie qu'il serait inobservable) la théorie prévoit (Zermelo) qu'en certains instants la goutte d'encre se concentrera à nouveau, etc. Soit. Mais la question est : pourquoi un physicien ne peut-il pas plonger une pipette au sein d'un mélange homogène d'eau et d'encre, et y "cueillir" une goutte d'encre qui s'y concentrerait à point nommé, de la même manière qu'il peut si aisément faire le contraire ?

En Calcul des Probabilités classique ce problème s'appelle "problème de la probabilité des causes", et il est discuté par exemple dans le beau livre *Le Hasard* d'E. Borel (1914). L'étiquette même attachée au problème : *probabilité des causes* apparaît aujourd'hui comme un exemple saisissant du pouvoir d'invention du sub-conscient, car elle implique l'existence d'une connexion intime entre le concept d'une *cause* développant *ensuite* des *conséquences* (par opposition à une *fin* organisant *auparavant* des *moyens*) et le principe de la probabilité croissante. Reichenbach, Grünbaum, Terletsky, Costa de Beauregard et, plus implicitement, d'autres auteurs modernes intéressés au problème de l'irréversibilité, démontrent explicitement qu'il en est bien ainsi ; on reviendra sur ce point.

Techniquement, la solution du problème de la "*probabilité des causes*" a été présentée (notamment par Borel) comme une application du principe de Bayes, impliquant qu'en *rétrodition* les probabilités intrinsèques de transition inhérentes au système doivent être pondérées par des probabilités *extrinsèques*, estimées au mieux en fonction de ce que l'on sait (ou de ce que l'on croit savoir) sur la façon dont ce système s'insère dans un contexte plus vaste. De la valeur de ces "*probabilités a priori*" la théorie ne dit rien d'autre que ceci : elles ne doivent *pas* être égales entre elles, car ceci équivaldrait à une "*rétrodition statistique aveugle*" et c'est justement *cela* qui est interdit. Il existe une longue et solennelle phrase de Willard Gibbs, souvent citée, qui énonce la chose (c'est nous qui soulignons) : "L'on ne devrait pas oublier, lorsque nos ensembles sont choisis pour illustrer les probabilités des événements du monde réel, que tandis que les probabilités des événements ultérieurs peuvent souvent être déduites de celles des événements antérieurs, il est rare que les probabilités des événements antérieurs puissent être déduites de celles des événements ultérieurs, *parce que l'on a rarement le droit d'exclure la considération de la probabilité antécédente des événements antérieurs*". Soit, mais pourquoi ? *Pourquoi cette dissymétrie temporelle de fait dans un problème qui semble être temporellement symétrique de droit ?*

Dire que les probabilités extrinsèques de Bayes sont choisies indépendamment de l'évolution interne, c'est dire qu'elles sont destinées à représenter au mieux l'interaction de ce système avec l'ambiance. Et dire que ces probabilités extrinsèques doivent être utilisées en rétrodition et non en prédiction, c'est dire que l'interaction développe ses effets sur le système considéré après qu'elle a cessé et pas avant qu'elle a commencé : c'est une "interaction originelle". C'est, par exemple, une pipette chargée d'encre introduite dans un verre d'eau, ou bien (exemple de Poincaré) une grosse planète qui, en

éclatant sous une influence interne (volcanisme) ou externe (passage d'un astre troublant) engendre l'essaim des petites planètes.

Mais n'est-ce pas cela même la définition de la causalité : *une interaction qui développe ses effets après qu'elle a cessé et pas avant qu'elle a commencé* ? Ne sommes-nous pas alors tout naturellement conduits à l'idée que *la causalité physique* (ou, pour employer le jargon du physicien, que *la loi des actions retardées*) *est une loi non pas du tout élémentaire, mais au contraire une loi macroscopique, et qu'elle s'identifie au principe, lui aussi macroscopique, de la probabilité croissante ou, si l'on préfère, de la rétrodiction aveugle interdite* ? Telle est la conclusion énoncée avec une force et une clarté incomparables par Reichenbach, Grünbaum, Terletsky, nous-mêmes, et qui est très clairement impliquée chez Watanabe, E.N. Adams, McLennan, Wu-Rivier, Penrose-Percival, et probablement d'autres auteurs encore. Plus spécifiquement, l'idée de voir dans la déduction statistique du principe de Carnot-Clausius une application du principe de Bayes se trouve en 1911 sous la plume de Van der Waals.

Quant à la *nature* de la prescription suivant laquelle (en physique) la probabilité va croissant et les "actions" sont (macroscopiquement) retardées, il est clair à présent que c'est une prescription de fait (*factlike*) mais non de droit (*not lawlike* : Mehlberg). Techniquement parlant, *c'est une condition aux limites* et, nommément, *une condition initiale* pour l'intégration des équations d'évolution *macroscopiques*.

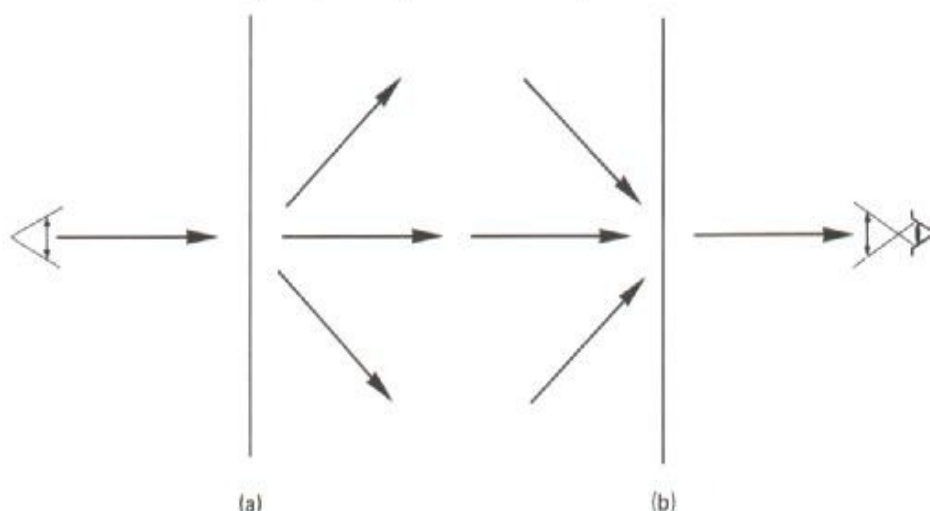
Par ailleurs, le principe *macroscopique* des ondes retardées n'est-il pas, lui aussi, une *prescription de fait et non de droit*, une *condition aux limites* et, nommément, une *condition initiale* pour l'intégration des équations d'onde ? Et les ondes classiques ne sont-elles pas, au sens quantique, des "ondes macroscopiques" engendrées par des moyennes statistiques appropriées ? La tentation est vraiment forte d'envisager un rapprochement entre ces deux classes de phénomènes, d'autant plus que les exemples physiques abondent dans ce sens : une météorite se freine en traversant l'atmosphère terrestre et elle émet des ondes balistiques et de rayonnement retardées, *qui sont en fait les médiatrices de la croissance de l'entropie du système*. Si, entre les instants t_1 et t_2 , un physicien déplace un piston dans la paroi d'un gaz en équilibre thermique, *le fait est* que la loi de distribution maxwellienne des vitesses est altérée après l'instant t_2 et pas avant l'instant t_1 ; mais le fait est *aussi* que cette perturbation est propagée comme une onde retardée émise (et non comme une onde avancée absorbée) par le piston. Le mécanisme de la croissance de l'entropie au sein d'un gaz inhomogène est la mutuelle diffusion des particules ; mais, aux termes de la Mécanique ondulatoire, celle-ci est aussi une mutuelle diffusion d'ondes, etc.

L'idée d'une connexion intime entre les deux principes de la croissance de l'entropie (ou de la probabilité : c'est plus fondamental, l'entropie n'étant alors croissante que si la base du système de logarithmes est plus grande que 1) et de la retardation des ondes a été agitée au cours d'une controverse passionnée entre Ritz et Einstein (1906-1909), controverse dans laquelle Ritz soutenait que le principe de la retardation des ondes est impliqué dans la loi de l'entropie croissante, Einstein affirmant qu'au contraire la loi de la retardation des ondes devrait être comprise au moyen de considérations de probabilité. Ce fut un vrai dialogue de sourds, dans lequel il semble que chacun des interlocuteurs méconnut le caractère *de fait* (plutôt que *de droit*) du principe qu'il considérait fondamental. Cela, joint à l'accident que, si le concept du

photon d'Einstein était connu à l'époque, celui de l'onde matérielle broglie ne l'était pas encore, a empêché les deux illustres protagonistes de reconnaître que la thèse et l'antithèse qu'ils défendaient avec tant d'acharnement étaient proprement *réci-proques* l'une de l'autre...

Cette même idée d'un lien organique entre les deux principes de la probabilité croissante et des ondes retardées est impliquée dans la théorie de l'entropie d'un faisceau monochromatique de Planck, entropie dont la formule contient la constante h , et suppose donc le concept du photon. Il résulte de la formule de Planck que l'entropie du faisceau croît lors d'une diffusion, même cohérente. Mais le phénomène de la diffusion en cohérence de phases résulte directement du principe des ondes retardées... Le postulat (gratuit) des ondes avancées entraînerait au contraire (fort paradoxalement) à la fois une *con-fusion* en cohérence de phases, et une décroissance de l'entropie.

Voyons brièvement le problème en lui-même. Il est clair que si l'on veut pouvoir prouver une liaison organique entre les deux principes de la probabilité croissante et des ondes retardées, il faut le faire au sein d'une théorie où les deux concepts *d'onde* et de *probabilité* sont essentiels. Or une telle théorie existe, et c'est la Mécanique ondulatoire ou quantique. Nous avons indiqué, dans plusieurs publications, comment la discussion d'une expérience de pensée comme celle du réseau plan (appareil qui fait "transiter", au sens quantique, les quanta ou particules d'une onde plane monochromatique incidente à une onde plane monochromatique émergente) permet d'établir clairement le lien entre les deux principes de la probabilité croissante et de la retardation des ondes macroscopiques (Cf. Fig.). Dans le même esprit nous avons montré que la théorie de l'irréversibilité du processus de mesure quantique de Von Neumann est essentiellement une théorie de cette même association biunivoque. J'invite ceux de mes lecteurs qui sont au courant de la Mécanique quantique à établir par eux-mêmes ces démonstrations.



L'irréversibilité physique exprimée par une condition aux limites : expérience pensée de l'onde quantifiée et du réseau :

- a) ondes retardées et prédiction statistique aveugle.
- b) ondes avancées et rétrodictio-n statistique aveugle.

L'idée qui les sous-tend l'une et l'autre se ramène à ceci : étant donné qu'en Mécanique quantique les ondes retardées et avancées servent respectivement aux calculs de probabilités prédictifs et rétrodictifs, dire que la rétrodictio-n aveugle est interdite, ou dire

que les ondes avancées sont macroscopiquement inexistantes, c'est dire exactement la même chose de deux manières différentes.

L'entropie, a écrit prophétiquement Boltzmann, représente notre *défaut d'information* sur un système. Les récents créateurs de la Théorie de l'Information (Shannon, Wiener et d'autres) ont précisément défini l'information comme une entropie changée de signe, ou *néguentropie* ⁽²⁾ (Brillouin). Dans de beaux travaux récents Jaynes, Tribus, Katz ont montré que les méthodes de la Théorie de l'Information permettent une déduction extrêmement claire et concise des résultats significatifs de la Mécanique statistique, rendant très plausible l'idée que l'entropie des physiciens est *réellement* un défaut d'information, et que, si elle peut être considérée comme une grandeur tout à fait objective lorsque les (très) grands nombres de l'échelle macroscopiques sont en jeu, c'est de la même manière exactement qu'une *probabilité* tend vers une *fréquence*. Au contraire dans les problèmes portant sur de petits nombres (par exemple : une cloison est insérée dans une enceinte contenant une seule molécule : quelle est sa probabilité de présence de chaque côté ?), il est très clair que c'est un problème d'information qui est posé. Une remarque analogue vaut pour la relation entre l'intensité d'une onde macroscopique classique et les diverses probabilités associées à son homologue quantique ; compte tenu, bien sûr, des traits particuliers du probabilisme quantique, on conçoit bien que la "subjectivité" attachée à l'onde quantique fasse place à "l'objectivité" de l'onde macroscopique classique lorsque les grands nombres entrent en jeu.

Ceci étant rappelé, discutons de l'irréversibilité des deux transitions cybernétiques fondamentales analysées notamment par Brillouin, *néguentropie (macroscopique) $\longrightarrow$ information* et *information $\longrightarrow$ néguentropie (macroscopique)*. La première est caractéristique de l'*acquisition de connaissance* aux dépens d'une néguentropie préexistante, comme, par exemple, lorsque pour lire un texte ou examiner une photographie l'on doit dépenser la néguentropie contenue dans la source d'éclairage ; la seconde est caractéristique de la *production d'ordre* aux dépens d'une information préexistante, comme par exemple lorsqu'on émet un message dans une ligne téléphonique, ou lorsque le "démon de Maxwell" trie les molécules d'un gaz. Disons que la transition $N \longrightarrow I$ est la *transition cognitive* et la transition $I \longrightarrow N$ la *transition volitive*. Il est tout à fait curieux de constater que la cybernétique a ainsi retrouvé la double acception que le concept d'*information* avait reçue d'Aristote (le promoteur du mot et de l'idée) : chez Aristote l'*information* signifiait aussi bien la *connaissance qu'on peut acquérir* que le *pouvoir d'agir ou d'organiser*. Au cours des siècles ultérieurs, le premier seul de ces deux sens a gardé une large circulation (on acquiert une "information" en lisant un journal ou un prospectus, etc.) tandis que le second est devenu de plus en plus ésotérique, en fait limité au petit cercle des philosophes intéressés à la notion de finalité. La suite de l'argumentation va notamment montrer que les sorts si dissymétriques de l'information-connaissance et de l'information-action est le reflet direct de l'irréversibilité physique.

Cette irréversibilité, dans le présent contexte, s'exprime dans le *fait* que, aussi bien dans la chaîne caractéristique des machines cybernétiques (téléphones, calculatrices, etc.)

(2) Il se pose en français un problème d'orthographe auquel échappe l'anglais. Faut-il écrire *néguentropie* (comme cela se prononce) ou *neg-entropie* (ce qui est logique et explicite) ? Nous optons pour *néguentropie*.

$$I_1 \rightarrow N \rightarrow I_2$$

que dans celle caractéristique des mesures physiques et de ce qu'on peut pratiquement en tirer

$$N_1 \rightarrow I \rightarrow N_2$$

chacun des termes de la séquence est numériquement plus grand que le suivant.

Remarquons maintenant que la transition cognitive $N \longrightarrow I$, qui implique essentiellement une chute de néguentropie, appartient à la classe des si banales transitions causales, ou retardées, précédemment analysées, tandis, au contraire, que la transition volitive $I \longrightarrow N$ appartient à la classe des rares fluctuations s'écartant de l'équilibre statistique et qui, à la lumière de ce qui précède, doivent être dites finales, ou avancées. Cette remarque éclaire après coup, d'une très vive lumière, les remarques de Poincaré sur l'impossibilité de prévoir au sein d'un hypothétique cosmos anti-Carnot. *Causalité, prévisibilité statistique, connaissance rationnelle* d'un côté, *finalité, rétrodictibilité statistique, action volontaire* de l'autre, sont organiquement liées ; l'idée qu'on pourrait extraire de la connaissance d'une évolution anti-Carnot implique une contradiction interne, parce que, par définition même, la conscience cognitive est liée aux fluctuations descendantes, exactement comme la conscience volitive l'est aux fluctuations ascendantes. Les épistémologues de la biologie, notamment, se sont souvent étonnés que la finalité, qui semble si manifeste en biologie, soit si difficile à démontrer ; la raison de ce fait est, selon nous, que c'est *par définition même* que la conscience cognitive a l'évidence de la causalité, comme la conscience volitive a celle de la finalité, parce que *connaissance et causalité* d'une part, *volonté et finalité* de l'autre, sont organiquement liées. Si d'aventure un philosophe lit ces lignes, il s'exclamera que nous y enfonçons une porte ouverte ; soit, mais il n'est pas inintéressant de trouver qu'une longue enquête sur l'irréversibilité physique nous fait déboucher ici sur une porte entrouverte...

Cette porte entrouverte, qu'est-elle essentiellement ? Souvenons-nous de notre point de départ : la symétrie temporelle des évolutions des systèmes rigoureusement clos (P. et T. Ehrenfest), le caractère *de fait* et non *de droit* de l'irréversibilité physique (Mehlberg, Reichenbach, parmi d'autres auteurs récents). Le corollaire, ici, est que *de droit* les deux transitions cognitive $N \longrightarrow I$ et volitive $I \longrightarrow N$ sont parfaitement symétriques (une remarque qui, socialement parlant, traite équitablement le travailleur et l'intellectuel) mais que *de fait* l'observation est beaucoup plus aisée que l'action, au sens que les transitions à la Carnot (qui sont potentiellement cognitives) sont beaucoup plus fréquentes que les transitions anti-Carnot (qui sont potentiellement volitives). En d'autres termes, la finalité, qui *de droit* est symétrique de la causalité, est *en fait* beaucoup plus rare — un peu comme, dans un autre domaine, l'électron positif qui *de droit* est le symétrique de l'électron négatif (d'après la théorie de Dirac) est *en fait* beaucoup plus rare.

Il est évident, et ce sera notre ultime remarque, que le choix des unités physiques que nous trouvons "commodes" reflète une situation-existentielle-de-notre-être-au-monde, et par conséquent que la valeur (moyenne, grande ou petite) des constantes universelles, exprimée à l'aide de ces unités, reflète, elle aussi, cette situation existen-

tielle. A cet égard, il est remarquable que les constantes universelles de la Physique du XX^e siècle soient extrêmement grandes ou petites (lorsqu'elles sont exprimées en unités "pratiques") ; elles reflètent, de ce fait même, une physique quelque peu inhumaine, appliquée à l'étude de relations qui échappent par définition même à l'observation courante. Ainsi, évaluée en mètres et secondes, la constante universelle c mesurant la vitesse de la lumière dans le vide est "très grande" ; l'équivalent temporel associé par elle au mètre est "très petit" en secondes, et c'est à cause de cela que nous pouvons "jouer le jeu" de la vie courante comme s'il y avait un temps universel à la Newton — un temps universel qu'on retrouverait rigoureusement en passant à la limite $c \longrightarrow \infty$. Il semble plausible que la raison physiologique en vertu de laquelle nous trouvons "commode" d'adopter des unités de longueur et de temps associées telles que le mètre et la seconde, soit justement le fait que la vitesse de notre influx nerveux est de l'ordre d'un petit multiple du mètre par seconde. Semblablement, c'est parce que la constante h de Planck est si petite en unités "pratiques" que toute l'optique classique des ondes a pu être faite en ignorant l'existence du photon, et que toute la dynamique classique du "point matériel" a pu être faite en oubliant l'onde matérielle associée et les phénomènes de diffraction concomitants ; l'électromagnétisme classique est la limite pour $h \longrightarrow 0$ de l'électromagnétisme quantique, et la mécanique classique celle de la mécanique ondulatoire pour $1/h \longrightarrow \infty$.

Parlons donc, pour finir, de la petitesse de la constante k de Boltzmann évaluée en unités thermodynamiques "pratiques", ou plus précisément de la petitesse du coefficient de conversion, $k \ln 2$, d'une néguentropie évaluée en unités thermodynamiques et d'une information évaluée en bits, suivant la formule

$$\Delta N = k \ln 2 \Delta I.$$

De son fait, acquérir une information-connaissance est très bon marché en termes de néguentropie, tandis que produire de la néguentropie coûte très cher en termes d'information-action. Toute notre vie sociale est colorée par ce simple fait : on n'y "regarde pas" à dégrader de la néguentropie pour "diffuser de l'information" sous forme de prospectus que beaucoup de destinataires s'empressent de jeter au panier, tandis au contraire que l'un des principaux moyens de réduire le coût de la production en série est d'y réduire la part du travail humain.

Ainsi, la petitesse même de la constante k , ou $k \ln 2$, en unités pratiques, exprime une *situation existentielle où l'observation est aisée et l'action difficile* : la situation "irréversible de fait, mais réversible de droit", décrite par le principe de Carnot, où la causalité l'emporte sur la finalité.

Qu'arrive-t-il si l'on passe à la limite $k \longrightarrow 0$? L'on décrit une situation caricaturale où l'observation est rigoureusement gratuite et l'action tout à fait impossible, théorie qui a eu son heure de célébrité sous le nom de "théorie de la conscience épiphénomène". La cybernétique, quant à elle, a fait la découverte importante "qu'on ne peut rien avoir pour rien, pas même une observation" (Gabor). Elle a fait payer sa place de spectatrice — pour une somme très modique — à la conscience, mais du même coup elle l'a libérée et lui a permis d'être *aussi* actrice.

Notre citation finale sera empruntée à L. Brillouin : "La théorie de la relativité a semblé, au départ, ne conduire qu'à de très faibles corrections de la mécanique classique.

Les applications récentes de l'énergie nucléaire démontrent l'importance capitale de la relation masse-énergie. On peut espérer que la relation information-entropie occupera, tôt ou tard, une place de premier plan et que nous apprendrons à l'utiliser dans toute sa valeur".

RÉFÉRENCES

- ADAMS E.N. (1960), Irreversible processes in isolated systems, *Phys. Rev.* 120, 675.
- BOREL E. (1914), *Le Hasard*, Alcan, Paris.
- BRILLOUIN L. (1959), *La Science et la Théorie de l'Information*, Masson, Paris.
- COSTA DE BEAUREGARD O. (1925), L'irréversibilité quantique, phénomène macroscopique, *Louis de Broglie, physicien et penseur*, A. George éd., Albin Michel, Paris, 401.
- (1958), Equivalence entre les deux principes des actions retardées et de l'entropie croissante, *Cah. de Phys.*, 12, 317.
- (1963), *Le second Principe de la Science du Temps*, éd. du Seuil, Paris.
- (1964), Irreversibility Problems, *Proceedings of the International Congress for Logic, Methodology and the Philosophy of Science*, Y. Bar-Hillel ed, North Holland, 313.
- (1970), Is there a paradox in the theory of time anisotropy?, *A Critical Review of Thermodynamics*, E.B. Stuart, B. Gal-Or, A.J. Brainard eds., Mono Book Corp., Baltimore, 463.
- (1970), Temporal Asymmetry in Thermodynamics and Cosmology, *Proceedings of the International Conference on Thermodynamics*, Cardiff, 539.
- FOCK V. (1948), Interprétation de la fonction d'onde dirigée vers le passé, *Dokl. Akad. Nauk SSSR* 60, 1157.
- GRÜNBAUM A. (1962), Temporally asymmetric principles, parity between explanation and prediction and mechanism versus teleology, *Phil. of Science*, 29, 146.
- (1963), The anisotropy of time, *Philosophical Problems of Space and Time*, A.A. Knopf, New York, 209.
- JAYNES E.T. (1957), Information Theory and Statistical Mechanics, *Phys. Rev.*, 106, 620 et 108, 171.
- KATZ A. (1967), Principles of Statistical Mechanics, *The Information Theory Approach*, Freeman & Co, San Francisco.
- LEWIS G.N. (1930), The symmetry of time in Physics, *Science*, 71, 569.
- Mc LENNAN J.A. (1960), Statistical Mechanics of Transport in Fluids, 3, 493.
- MEHLBERG H. (1961), Physical laws and time arrow, *Current Issues in the Philosophy of Science*, Feigl & Maxwell eds. Holt, Rinehart, Winston, New York, 105.
- PENROSE O. et PERCIVAL I.C. (1962), The direction of time, *Proc. Phys. Soc.*, 79, 605.
- POINCARÉ H. (1906), Le calcul des probabilités, *La Science et l'Hypothèse*, Flammarion, Paris.
- (1908), *Le Hasard, Science et Méthode*, Flammarion, Paris.
- REICHENBACH H. (1956), *The Direction of Time*, Univ. of California Press, Berkeley.
- TERLETISKY J.P. (1960), Le principe de causalité et le second principe de la thermodynamique, *Journal de Physique* 21, 681.

- Van der WAALS J.D. (1911), Ueber die Erklärung der Naturgesetze auf statistischmechanischen Grundlage, *Phys. Zeits.*, 12, 547.
- WATANABE S. (1952), Réversibilité contre irréversibilité, *L. de Broglie, physicien et penseur*, A. George ed. Albin Michel, Paris, 385.
- (1955), Symmetry of physical laws, *Phys. rev.*, 27, 26, 40, 179.
- (1958), Le concept de temps dans le principe d'Onsager, *Transport Processes in Statistical Mechanics*, I. Prigogine ed. Interscience, New York, 285.
- WIENER N. (1958), *Cybernetics*, Hermann, Paris.
- WU T.Y. et RIVIER D. (1961), On the time arrow and the theory of irreversible processes, *Helv. Phys. Acta.*, 34, 661.