

PRÉLUDE À L'IRRÉVERSIBILITÉ LA « FLECHE DU TEMPS » EST-ELLE UN FAIT DE LA NATURE?

MICHEL BITBOL
CNRS, Paris

Paru dans : *Sciences et Avenir*
(Numéro spécial Les énigmes du
temps), Mars 1994

Tout commence par quelques lieux communs. Nous voyons une rose éclore, ou un morceau de sucre fondre dans l'eau. Nous sommes certains, si l'on nous présente un film qui montre une rose fanée retrouvant ses couleurs, ou un sucre fondu reprenant sa forme puis sortant tout seul de l'eau, que la projection a lieu en sens inverse du tournage. Nous distinguons entre un fait, qui s'est irrémédiablement produit, et une possibilité, dont la réalisation dépend en principe de notre décision d'agir. Face à cela, les lois régissant la plupart des processus physiques élémentaires manifestent une symétrie temporelle sans faille, une indifférence déroutante vis-à-vis de la distinction entre le passé et le futur.

Ce «paradoxe de l'irréversibilité», connu depuis plus d'un siècle, a été abordé sous de nombreux angles, mais la plupart des solutions proposées se rejoignent sur un point. Presque toutes partent de l'hypothèse que la source de l'irréversibilité se trouve quelque part *dans* la nature. Dans des lois encore inconnues, dans les conditions qui régnaient au commencement de l'univers, dans la constitution biologique de l'homme, ou dans sa situation particulière au sein de son environnement physique¹.

Une autre stratégie de recherche est pourtant disponible pour rendre raison de l'irréversibilité constatée. Elle consiste à retourner l'attention, jusqu'ici focalisée sur la nature, vers les conditions expérimentales, linguistiques, et intellectuelles, qui nous permettent de décrire une nature. Ne se pourrait-il pas que l'irréversibilité soit déjà impliquée par les présupposés ou les méthodes de nos sciences expérimentales, et que nous ne fassions ensuite que la projeter sur la nature?

Niels Bohr, l'un des premiers, a exploré cette voie. Vers la fin des années 1920, il se heurtait en effet à la version quantique du paradoxe de l'irréversibilité. D'un côté, chaque phénomène d'échelle atomique se manifeste à travers un dispositif de mesure capable d'en garder la trace; et cette trace ne peut se produire que si le dispositif a été le siège d'un processus irréversible d'amplificationⁱⁱ. Mais d'un autre côté, la loi d'évolution de la théorie quantique, appelée l'équation de Schrödinger, est formellement réversible. La contradiction apparente, remarque Bohr dans un articleⁱⁱⁱ de 1932, est très voisine de celle qui se manifestait déjà au dix-neuvième siècle entre la loi thermodynamique de croissance irréversible de l'entropie et la réversibilité des lois de la mécanique classique. Il reste à savoir que faire de cette analogie. La tentation est de s'en prévaloir pour transposer au paradoxe quantique de l'irréversibilité toutes les méthodes qui ont permis d'affronter le paradoxe classique. Comme beaucoup de physiciens l'ont fait après lui, Bohr aurait pu essayer de montrer que, dans le cas quantique comme dans le cas classique, une irréversibilité à grande échelle émerge du traitement statistique d'un grand nombre de processus microscopiques réversibles. Mais Bohr s'en est bien gardé. Car selon lui, les procédés de la physique statistique sont loin d'avoir jeté toute la lumière sur le

paradoxe classique de l'irréversibilité. Plutôt que de plaquer d'anciennes solutions mal élucidées sur un nouveau problème, il vaut donc mieux se demander si le nouveau problème ne fournit pas l'occasion rêvée de tout remettre à plat, et de mieux apercevoir où gisent les difficultés communes à tous les paradoxes de l'irréversibilité.

Après une longue méditation dont il livre les résultats dans quelques lettres adressées en 1947 à son collègue Wolfgang Pauli, Bohr «sent» de plus en plus nettement que la racine des problèmes d'irréversibilité «est purement épistémologique». Il n'exclut pas que des considérations statistiques sur la complexité des appareils de mesure puissent avoir leur rôle à jouer, mais il juge inutile de pousser très loin les calculs, car le fin mot de l'énigme lui semble se situer en deçà des formalismes physiques mis en jeu. Où doit-on le chercher, alors? Dans une notion élémentaire nommée l'«observation», que toute science expérimentale présuppose et à laquelle renvoient les symboles des théories physiques. «Le concept même d'observation entraîne une irréversibilité de principe (...)\», écrit Bohr. C'est du *concept* d'observation que provient l'irréversibilité constatée, et non pas de la nature observée, ni de la constitution de tel dispositif d'observation. Au moment où il propose cette idée, Bohr a déjà quelques exemples en tête pour illustrer cette affirmation. L'un d'entre eux, très simple, provient de la thermodynamique.

La thermodynamique est une science physique dont la variable la plus spécifique est la température. Ses lois concernent beaucoup d'autres quantités, comme la chaleur, l'entropie, la pression ou le volume, mais il est toujours possible de classer ces quantités en deux catégories. Celles qui ont partie liée avec la température, comme la chaleur et l'entropie, et celles qui sont

empruntées à la mécanique, comme la pression et le volume. On ne doit pas s'étonner dans ces conditions que la température joue un rôle crucial dans le raisonnement que Bohr nous livre dans son article de 1932. Pour mesurer une température, remarque-t-il, on doit commencer par mettre un thermomètre au contact du corps à mesurer. Et on doit attendre jusqu'à ce que la température du réservoir du thermomètre soit devenue égale à celle du corps. A partir de ce moment, on peut effectuer la lecture. Lorsqu'on mesure une température, on admet donc implicitement que les températures du thermomètre et du corps mis au contact vont progressivement s'égaliser et rester stables par la suite, quelles que soient les différences de température initiales. Or l'égalisation de la température entre deux objets s'accompagne d'un accroissement de l'entropie totale du système clos qu'ils composent; et la stabilisation dans l'état d'entropie maximale où les températures sont identiques, indique que le processus est irréversible. Que doit-on en conclure? Ceci: le principe de la mesure des températures repose déjà sur l'hypothèse tacite d'une évolution irréversible. La définition de la variable température n'étant rien d'autre que l'énoncé du principe de sa mesure, on se lie à cette hypothèse tacite d'irréversibilité par le seul fait d'employer la variable température dans une théorie nommée la thermodynamique.

Nous sommes à présent en mesure de saisir l'une des réflexions les plus raffinées de Bohr, l'une de ces phrases si ramassées et si concises qu'elles mettent parfois les commentateurs au désespoir. «En fait, dit Bohr en 1932, l'irréversibilité thermodynamique manifestée par l'égalisation des températures ne signifie pas que la réversion du cours des événements est impossible, mais que la prédiction d'une

telle réversion ne peut en aucune manière être partie intégrante d'une description impliquant la connaissance des températures des divers corps». Autrement dit, il se peut que l'irréversibilité ne soit pas strictement inscrite dans le cours des choses, mais aussitôt que nous avons choisi de décrire certaines de ces choses en termes d'évolution de la variable température, nous nous sommes coupés de toute possibilité de prédire leur réversion. L'irréversibilité découle de la grille de lecture que nous avons imposée aux phénomènes.

Prenons encore un peu de recul. Pour bien apprécier une phrase comme celle qui vient d'être citée, il ne suffit pas de la traduire en termes simples. Il faut écarter systématiquement tous les malentendus qu'elle risque de faire naître; il faut souligner ce qu'elle ne dit pas et qu'on lui a trop souvent fait dire. En particulier, elle ne dit pas que l'irréversibilité est causée par la *perturbation* qu'occasionnerait la mise en contact d'un thermomètre avec le corps de référence. Aussi petit que soit le thermomètre, aussi négligeable que soit la perturbation qu'il provoque, et aussi rares que soient les coups de sonde effectués, la définition de la variable température présuppose d'emblée l'égalisation thermique. C'est la *définition* des variables qui contraint à une description irréversible, et non pas le fait de mesurer la température à tel moment, ni le fait d'utiliser un thermomètre grossier ou perturbant. Il est vrai que cette définition elle-même pourrait avoir été imposée à notre insu par l'échelle de nos instruments, beaucoup plus grands que les atomes qui composent les corps. Mais cela non plus, la phrase de Bohr ne le dit pas. Ce qu'elle cherche à donner, ce n'est pas la raison circonstancielle de la définition des variables de la thermodynamique; c'est un message de portée beaucoup plus générale: le choix d'un système

d'hypothèses et de définitions opératoires des quantités peut suffire à imposer l'irréversibilité dans une description de la nature impliquant ces quantités.

Bien entendu, dans le cas précédent, celui de la thermodynamique, la ficelle est un peu grosse. On voit trop clairement ce que les hypothèses ont de conventionnel. Les définitions de la thermodynamique pourraient être remplacées par d'autres. Une alternative crédible à la fin du dix-neuvième siècle consistait par exemple à essayer de rendre compte des mêmes phénomènes dans le cadre de la mécanique classique, en termes de positions et de vitesses réversibles des atomes composant les corps (c'est la théorie cinétique des gaz). Dans ce dernier cas, ainsi que l'a appris à ses dépens L. Boltzmann, l'irréversibilité n'est pas directement prévue par la théorie. Elle doit être introduite artificiellement, par des hypothèses comme celle du 'chaos moléculaire', et par le choix d'un niveau de description statistique.

Mais il est d'autres hypothèses et définitions dont il est beaucoup plus difficile de se débarrasser, parce qu'elles concernent des domaines très vastes des sciences. Il en est même qu'on peut à peine appeler des hypothèses tant elles sont informulées et tant elles s'imposent à nous dès que nous voulons manipuler les objets de la vie courante ou échanger des informations avec nos semblables. Manipuler des objets, cela demande d'*anticiper* le résultat du geste effectué et de s'*assurer après coup* de sa bonne réalisation. Parler avec quelqu'un, cela requiert de dire quelque chose et d'*attendre* une réplique. N'est-ce pas là la grille de lecture silencieuse et omniprésente qui implique par avance, ou qui «préconditionne»^{iv}, un élément d'irréversibilité dans la description de notre environnement?

Ici, un chercheur pourrait se lever et dire: «mon rôle consiste à formuler les

hypothèses informulées, et à en rendre raison. Rien ne peut m'empêcher de proposer une explication scientifique des conduites d'anticipation de l'homme». Et il faut le lui accorder. Tenter d'expliquer nos attitudes d'attente par des caractéristiques physico-chimiques des processus cérébraux est un programme de recherche envisageable. Malheureusement, la réalisation éventuelle de ce programme risque de ne rien nous apprendre de fondamental sur l'origine de l'irréversibilité. Car la description physico-chimique du corps humain est elle-même préconditionnée par les anticipations et les attentes dont elle cherche à rendre compte... L'issue hors du cercle du connaissant et du connu n'est, pas plus ici qu'ailleurs, en vue.

Alors, sans doute vaut-il mieux continuer sur le chemin que nous nous sommes tracé, et voir maintenant si l'idée d'une irréversibilité imposée *a priori* par un système d'hypothèses implicites et de définitions peut servir à clarifier la variété quantique du paradoxe. Il n'y a rien là de trop compliqué si l'on suit pas à pas le raisonnement d'un expérimentateur. L'expérimentateur voudrait bien que la théorie lui permette de prédire le résultat de sa prochaine mesure d'une certaine variable. Or, le formalisme quantique ne lui fournit généralement, par le biais de sa «fonction d'onde», que la *probabilité* de chaque résultat. Plus gênant encore, le formalisme quantique est difficilement compatible avec la croyance selon laquelle les objets tiennent déjà toute prête une valeur encore ignorée de la variable, que la mesure va seulement nous révéler. *Last but not least*, la description quantique de l'évolution des fonctions d'onde par l'équation de Schrödinger appliquée de proche en proche à l'appareil de mesure, semble mettre en cause, si elle est prise à la lettre, la croyance que cet appareil de mesure a enregistré un résultat bien

déterminé à la suite de son interaction avec un objet^v! Mais que serait le travail d'un expérimentateur sans la certitude d'avoir obtenu un résultat? Comment pourrait-il communiquer avec ses collègues s'il ne pouvait leur rapporter des résultats bien déterminés? L'expérimentateur doit donc admettre qu'à un moment ou à un autre cette description quantique n'est plus pertinente pour lui, et qu'il faut alors l'ignorer au profit de la simple affirmation: «tel résultat déterminé s'est inscrit sur l'écran de mon appareil». Ou alors, ce qui est équivalent, il doit forcer le résultat obtenu dans le formalisme quantique par le procédé un peu artificiel de la «réduction du paquet d'ondes». Ce passage d'un ensemble de résultats possibles (et plus ou moins probables) à un résultat effectif constitue par lui-même un élément d'irréversibilité.

La situation est en définitive assez voisine de celle de la thermodynamique vue par Bohr, à ceci près qu'en thermodynamique l'irréversibilité était imposée par la définition d'une variable particulière (la température) tandis qu'en mécanique quantique elle est imposée par la condition beaucoup plus incontournable selon laquelle les variables *doivent* prendre une valeur bien déterminée lorsqu'on les a mesurées. Contrairement à l'irréversibilité de la description thermodynamique dont on apercevait vite l'aspect conventionnel, celle de la description quantique est ancrée dans des présupposés qui atteignent la généralité de ceux dont nous dépendons pour notre vie de tous les jours. La source épistémologique de l'irréversibilité est décidément bien plus fondamentale en mécanique quantique qu'en thermodynamique.

De nombreux efforts ont été déployés pour donner un statut scientifique à cette prescription toute simple mais porteuse d'irréversibilité

«qu'à la suite d'une expérience, un résultat déterminé doit être obtenu». La racine en a été cherchée dans la nature telle que la théorie quantique la décrit, au risque de faire ressurgir le spectre de la circularité. À l'issue de ces recherches parfois décevantes, on a tout de même obtenu une satisfaction: le système formé par le formalisme quantique (sans «réduction du paquet d'ondes») et la prescription de détermination des résultats expérimentaux se révèle consistant, à une approximation négligeable près^{vi}. L'association du formalisme quantique réversible et de la notion d'observation irréversible n'engendre pas de franche contradiction. C'est moins qu'une résolution du «paradoxe de l'irréversibilité», mais c'est déjà plus qu'une fin de non-recevoir.

ⁱVoir P.C.W. Davies, *The physics of time asymmetry*, University of California Press, 1977

ⁱⁱN. Bohr, *Physique atomique et connaissance humaine*, introduction et annotations par C. Chevalley, Folio-Gallimard, 1991, p. 259

ⁱⁱⁱCet article «Chemistry and the theory of atomic constitution», ainsi que les lettres de Bohr à Pauli se trouvent dans: N. Bohr, *Collected Work*, vol. 6, J. Kalckar (ed.), North-Holland, 1985

^{iv}Th. Görnitz, E. Ruhnau, and C.F. v. Weizsäcker, «Temporal asymmetry as precondition of experience», *Int. J. Theor. Phys.*, 31, 37-46, 1992

^vIl s'agit là du «problème de la mesure», joliment illustré par la parabole du «chat de Schrödinger». E. Schrödinger, *Physique quantique et représentation du monde*, introduction et notes par M. Bitbol, Points-Seuil, 1992.

^{vi}Il est fait ici allusion aux théories de la «décohérence». Voir: W.H. Zurek, «Environment-induced superselection rules», *Phys. Rev. D* 26, 1862-1879, 1982.