Journal de la Société de Biologie, 193 (4), 385-393 (1999)

La physique et le temps

par Etienne Klein

Direction des Sciences de la Matière, Centre d'Études de Saclay, 91191 Gif sur Yvette Cedex
E-mail: klein@dsmdir.cea.fr

Reçu le 15 septembre 1999

L'IMPOSSIBLE DÉFINITION DU TEMPS

Par quelque bout qu'on le prenne, le temps est aporétique. En dépit de son allure familière, il suscite des impasses et des paradoxes de toute sorte, dont le nombre semble grandir avec la pénétration du regard. La première difficulté, repérée par Saint-Augustin, est que le mot temps ne dit pratiquement rien de la chose qu'il est censé exprimer. Le mot temps désigne – en apparence – l'objet d'un savoir et d'une expérience immédiats, mais il se perd dans les brumes dès qu'on veut en saisir le contenu. Bien sûr, on peut tenter de définir le temps : dire qu'il est ce qui passe quand rien ne se passe ; qu'il est ce qui fait que tout se fait ou se défait ; qu'il est l'ordre des choses qui se succèdent ; qu'il est le devenir en train de devenir ; ou, plus plaisamment, qu'il est le moyen le plus commode qu'a trouvé la nature pour que tout ne se passe pas d'un seul coup. Mais toutes ces expressions présupposent ou contiennent déjà l'idée du temps. Elles n'en sont que des métaphores, impuissantes à rendre compte de sa véritable intégrité. D'où une certaine frustration, dont on peut se libérer en admettant qu'un mot n'a pas un sens qui lui soit donné pour ainsi dire par une puissance indépendante de nous, de sorte qu'il pourrait ainsi y avoir une sorte de recherche scientifique sur ce que le mot veut réellement dire. Un mot a le sens que quelqu'un lui a donné, et seulement celui-là. Ainsi, il faut reconnaître que le sens d'un mot n'est rien d'autre que les façons qu'on a de s'en servir. Il n'y a pas à se poser la question d'une vérité qu'ils détiennent ou qu'ils masquent.

De fait, les physiciens sont parvenus à faire du temps un concept opératoire sans être capables de définir précisément ce mot. De façon générale, nous méditons sur le temps sans trop savoir à quel type d'objet on a affaire. Le temps est-il un objet naturel, un aspect des processus naturels, un objet culturel ? Est-ce parce que nous le désignons par un substantif que nous croyons abusivement à son caractère d'objet ? Qu'est-ce donc qu'indiquent vraiment les horloges quand nous disons qu'elles donnent l'heure[1] ? Est-ce parce que nous sommes capables de mesurer le temps que de nombreuses locutions familières suggèrent que le temps est un objet physique ? Mais l'idée que nous avons du temps est-elle un fidèle décalque de la réalité ? En tant qu'objet de réflexion, ne se ramène-t-il pas plutôt à une représentation forgée par l'individu ? Le temps existe-t-il autrement que par les traces qu'il laisse dans l'espace (écoulements, érosions, battements réguliers, cycles...) ?

LES DIFFICULTÉS PROPRES AU TEMPS

Il y a une deuxième difficulté à propos du temps. Elle consiste en ce que nous ne pouvons pas nous mettre en retrait par rapport à lui. D'habitude, lorsque nous voulons étudier un objet, nous commençons par l'observer sous divers angles, mais lorsqu'il s'agit du temps, la mise à distance n'est plus possible puisqu'il nous affecte sans cesse. Nous sommes *dans* le temps et nous ne pouvons pas en sortir. C'est d'ailleurs une caractéristique que le temps partage avec l'espace puisque nous ne pouvons pas non plus nous extraire de l'espace. Mais il y a une différence essentielle entre le temps et l'espace : nous pouvons nous déplacer à l'intérieur de l'espace, aller et venir dans n'importe quelle direction, alors que nous ne pouvons pas changer notre place dans le temps (au grand dam des poètes). L'espace est donc le lieu de notre liberté, le temps la métaphore de notre emprisonnement.

Une troisième difficulté vient de ce que le temps n'est pas perceptible en tant que phénomène brut. Il n'a pas de goût, il est invisible, inodore, silencieux et insaisissable. Les expériences des « spéléonautes » (ces hommes et ces femmes qui ont vécu plusieurs mois sans montre ni horloge dans des grottes ou dans des bunkers, c'est-à-dire en étant coupés de tous les cycles temporels externes et donc livrés à leurs seuls rythmes biologiques) ont bien établi l'impossibilité de quantifier les durées de façon précise dès lors que tous les repères extérieurs ont disparu. Très rapidement, l'appréciation des durées qui est faite dans ces conditions se décale notablement de ce qu'indiquent les horloges.

Enfin, il y a le paradoxe de la réalité du temps. De fait, le temps est toujours disparaissant[2]. Son mode d'être est

[1] Le temps ordinaire se montre dans « la présentification de l'aiguille qui avance » (Heidegger, l'Être et le Temps, § 81).

[2] Ludwig Wittgenstein se demandait : « Où va le présent quand il devient passé, et où est le passé ? » Voilà, disait-il, une des plus grandes sources d'embarras philosophique.

de ne pas être[3]. « Il ne se montre que nié », écrit Marcel Conche[4]. Le temps contient la totalité de ce qui est, mais nous ne parvenons à le penser autrement que comme une limite disparaissant toujours entre deux néants qui sont le passé et l'avenir. D'où la question, constamment rediscutée depuis Aristote : un être qui n'est qu'en cessant d'être, est-ce encore un être ? Ne s'agit-il pas plutôt d'une illusion ? D'une sorte de chatoiement du néant ?

Mais si l'on peut ainsi s'interroger sur l'existence du temps, il est en revanche très difficile de contester l'existence de ses effets. Comment ne pas voir les marques et autres raclures qu'il imprime sur les choses ? Comment oublier le vieillissement irréversible qu'il impose ? Par ailleurs, qui pourrait nier par exemple la « pression » qu'exerce sur nous le temps par le biais des calendriers, des horloges, des horaires, des « plannings »[5] ?

Nous sommes incapables de dire ce qu'est le temps, et tout aussi incapables de dire le monde sans faire appel à lui.

Peut-être pourrait-on résoudre la contradiction en pensant le temps comme ce qui fait que les choses *persistent* à être dans le présent. Le présent est toujours présent, par définition, mais il n'est jamais le même. Le temps allie donc au sein même du présent l'idée de permanence à celle de changement, la notion de statique à celle de dynamique.

TEMPS PHYSIQUE *VERSUS* TEMPS PSYCHOLOGIQUE

Il y a au moins deux sortes de temps : le temps physique, celui des horloges, et le temps subjectif, celui de la conscience. Le premier est censé ne pas dépendre de nous, il est réputé uniforme et nous savons le chronométrer. Le second, le temps que l'on mesure de l'intérieur de soi, dépend évidemment de nous et ne s'écoule pas uniformément : il se déroule « en ligne brisée », mêlant des rythmes différents et des discontinuités ; sa fluidité est même si variable que la notion de durée éprouvée n'a qu'une consistance très relative. Il n'y a vraisemblablement pas deux personnes qui, dans un temps donné, comptent un nombre égal d'instants. Il a été prouvé que notre estimation des durées varie notablement avec l'âge et, surtout, avec la signification et l'intensité des événements qui se produisent. Notre temps psychologique est élastique.

L'irréductibilité de ces deux sortes de temps semble insurmontable. Les tentatives pour dériver le temps du « monde » du temps de « l'âme » ou celui-ci de celui-là paraissent indéfiniment condamnées à l'échec[6]. On doit donc envisager une pluralité de temps : non une pluralité apparente derrière laquelle on devrait découvrir un temps supposé le seul vrai, mais d'une pluralité réelle et insoluble, et qu'il faut accepter telle quelle. L'aporie entre temps physique et temps psychologique apparaît déjà autour de la structure du présent[7], fracturée entre deux modalités : le temps physique réduit l'instant ponctuel à une coupure entre un avant et un après illimités, alors que le temps psychologique présente un présent vivant, gros d'un passé immédiat et d'un futur imminent[8]. Nous ne percevons le présent qu'au travers d'une représentation qui en érode la vigueur. Cette représentation peut se résumer par ce que Clément Rosset appelle un certain coefficient d' « inattention à la vie »[9], au sein même de la perception attentive et utile. Le passé et l'avenir sont toujours là pour gommer une part de l'éclat du présent. Le lien entre cette perception mélangée que nous avons du présent et le présent lui-même n'est pas clair. Aucune de nos sensations n'indique l'alchimie par laquelle une succession d'instants parvient à s'épaissir en durée (nous ne sentons pas les instants[10]). D'ailleurs, qui

[3] Nous ne palpons pas le présent en lui-même. Nous sommes d'ailleurs sans cesse étonnés par le peu de présence de sa présence. Nous ne prenons conscience du présent que comme d'un moyen en vue de l'avenir.

[4] Marcel Conche, *Temps et destin*, Paris, PUF, 1992, p. 24.

[5] Cette pression est très forte dans les sociétés dont le mode de vie est « occidental ». La sagesse africaine dit très justement que « ceux qui ont des montres n'ont pas le temps ».

[6] Kant avait déjà tenté le grand écart en cherchant à les concilier. Pierre Boutang en a souligné l'échec : « demeure l'énigme et même la ténèbre : l'ambiguïté du temps chez Kant entre son *a priori* originel qui l'emprisonne en un mode singulier de la sensibilité humaine et sa coextension à l'ensemble des phénomènes du monde, n'a été expliquée – à plus forte raison levée – par aucune des philosophies et des cosmogonies des deux siècles suivants » (P. Boutang, *Le Temps. Essai sur l'origine*, Paris, Hatier, 1993, p. 67). Je suis le temps et je suis dans le temps. C'est là l'énigme du temps.

[7] Le propre de la conscience est de ne jamais être tout à fait présente au présent. « Nous ne nous tenons jamais au temps présent, constatait Pascal. Nous anticipons l'avenir comme trop lent à venir, comme pour hâter son cours ; ou nous rappelons le passé pour l'arrêter comme trop prompt... Que chacun examine ses pensées, il les trouvera toutes occupées au passé et à l'avenir. Nous ne pensons presque point au présent ; et si nous y pensons, ce n'est que pour en prendre la lumière pour disposer de l'avenir. Le présent n'est jamais notre fin : le passé et le présent sont nos moyens ; le seul avenir est notre fin. Ainsi nous ne vivons jamais, mais nous espérons de vivre ; et, nous disposant toujours à être heureux, il est inévitable que nous ne le soyons jamais. » (Blaise Pascal, *Pensées*, éd. Brunschvig, frag. 172 (Lafuma 47)). Nous ne prenons effectivement conscience du présent que comme d'un moyen en vue de l'avenir, comme le soulignait également fort bien Montaigne : « Notable exemple de la forcenée curiosité de notre nature, s'amusant à préoccuper les choses futures, comme si elle n'avait pas assez à digérer les présentes ». (Montaigne, Essais, I, chap. XI, *Des prognostications*).

[8] Les spécialistes des neurosciences expliquent que la conscience fonctionne par séquences de trois secondes, pendant lesquelles un ensemble de données restent présentes simultanément à l'esprit.

[9] Clément Rosset, *Le Réel et son double*, Paris, Editions Gallimard, 1976, p. 63.

[10] Husserl a exploré la piste de « l'instant qui s'écoule », en se servant de l'introspection des états de conscience. Il se penche sur la perception de la durée et remarque que lorsqu'on entend une mélodie, la note précédente est « retenue » avec la note présente et la projection de la note future pour former un ensemble harmonieux. Passé immédiat et futur immédiat coexistent dans le présent. Sinon, chaque note serait isolée et il n'y aurait pas de mélodie. Cela expliquerait la fluidité de l'écoulement des instants dans notre conscience.

dit le mieux cette conflictualité irréductible du temps du monde et du temps de l'âme, sinon la poésie la plus populaire, celle où l'on dit que la vie est brève, les amours éphémères et la mort certaine[11] ?

Constatant qu'on ne peut pas choisir entre le temps objectif et le temps subjectif, Paul Ricœur a imaginé un tiers-temps, le temps raconté, qui est « comme un pont jeté par-dessus la brèche que la spéculation ne cesse de creuser entre le temps phénoménologique et le temps cosmologique [12] ». Autrement dit, le temps n'existe que si on le crée, que si on le raconte.

LA PHYSIQUE ET LE TEMPS

Les scientifiques de toute discipline sont confrontés au temps. Nous parlerons surtout des physiciens. La physique a longtemps cherché à éliminer le temps. Le temps est associé au variable, à l'instable, à l'éphémère, tandis que la physique, elle, est à la recherche de rapports qui soient soustraits au changement. Lors même qu'elle s'applique à des processus qui ont une histoire ou une évolution, c'est pour y discerner soit des substances et des formes, soit des lois et des règles indépendantes du temps. Mais dans sa pratique, elle se heurte au temps. Reprenons la métaphore classique comparant le temps à un fleuve qui coule : « Le temps est un fleuve fait d'événements... »[13]. Elle évoque les notions d'écoulement, de succession, de durée, d'irréversibilité. Ces symboles font partie du questionnement des physiciens. Est-il question d'écoulement ? Les physiciens se demandent si l'écoulement du temps est élastique ou non. La physique classique, sur ce point, ne répond pas comme la relativité. Est-il question de durée ? Les cosmologistes, quant à eux, aimeraient savoir si le temps a eu un début et s'il aura une fin. Enfin, à l'instar du fleuve, le temps a un cours : il s'écoule inexorablement du passé vers l'avenir (ce cours irréversible n'est pas un caractère du temps parmi d'autres caractères, il *est* la temporalité même du temps). Mais qu'en est-il des phénomènes qui se déroulent dans le temps, s'interrogent les physiciens ? Leur sens peut-il ou non s'inverser ? C'est la fameuse question de la réversibilité – ou de l'irréversibilité – des lois physiques.

Le temps s'incarne en physique sous la forme d'un nombre réel, le paramètre t. Il n'a donc qu'une dimension (un seul nombre suffit à déterminer une date) et on peut fixer sa direction d'écoulement (il est orientable). Une telle figuration du temps postule implicitement qu'il n'y a qu'un temps à la fois et que ce temps est continu. Elle s'appuie sur notre expérience intérieure la plus sûre, qui nous présente parfois des événements qui se chevauchent, mais jamais de lacunes : il ne cesse jamais d'y avoir du temps qui passe. Contrairement à celle de l'espace, la topologie du temps est très pauvre. Elle n'offre que deux variantes, la ligne ou le cercle, c'est-à-dire le temps linéaire, qui va de l'avant, ou le temps cyclique, qui fait des boucles. Ce dernier, favorisé par le caractère magique du cercle, a prévalu dans les mythes mais il est aujourd'hui délaissé par la physique parce qu'il ne respecte pas le principe de causalité. Ce principe, indiquant qu'une cause ne peut qu'être antérieure à ses effets, impose au temps d'avoir une structure ordonnée de façon qu'on puisse toujours dire si un point se situe avant ou après un autre point. Les événements peuvent alors être ordonnés selon un enchaînement irrémédiable, de sorte qu'on ne peut rétroagir dans le passé pour modifier une séquence d'événements qui ont déjà eu lieu. En brouillant les notions de cause et d'effet, un temps cyclique n'offrirait pas de telles garanties[14].

On trouve le paramètre représentant le temps dans toutes les équations de la physique, sous une forme plus ou moins explicite. Cette omniprésence n'est-elle pas incongrue dans la mesure où la physique, comme nous l'avons dit, tend à nier le temps en faisant appel à des « idéaux immobiles » ? Le monde doit-il être vu plutôt comme un système ou plutôt comme une histoire ? De ce point de vue, la physique d'aujourd'hui demeure écartelée entre deux piliers de la pensée grecque : d'un côté Parménide, le philosophe de l'Être et de l'immobilité fondamentale ; de l'autre, Héraclite, le philosophe du devenir et de la mouvance, qui voyait le temps comme un pur devenir, comme un flux toujours en mouvement[15]. Ce vieux débat n'a cessé d'opposer, au travers des âges, deux camps : d'un côté celui qui comprend Newton et Einstein, partisans d'une éradication du temps en physique ; de l'autre, celui qui compte des physiciens persuadés que l'irréversibilité est en fait présente à toutes les échelles de la physique, mais qu'on a eu tort de l'oublier. La physique a-t-elle vocation à décrire l'immuable ou bien doit-elle être la législation des métamorphoses ? Telle est la question.

[11] Heidegger l'avait bien vu : le temps subjectif est lié à la notion de finitude. L'esprit humain, angoissé par sa propre mort, en décharge la puissance affective sur la notion plus neutre, en tout cas extérieure et vague, de temps.

[12] Paul Ricœur, *Temps et récit*, Paris, Le Seuil, 1983-1985, tome III, p. 441.

[13] Marc Aurèle, *Pensées*, IV, 43 (trad. Bréhier, Gallimard, Bibliothèque de la Pléiade, Les stoïciens, p. 1166). La métaphore est vraisemblablement d'origine héraclitéenne : c'est une reprise du fameux *Panta rhei* (« tout coule ») et du non moins fameux fleuve dans lequel nul ne peut entrer deux fois. C'est que le fleuve n'est pas un « étant » identique à lui-même. Il n'est pas un seul instant le même ; il n'est fait que d'événements toujours autres. Mais c'est aussi que, fût-il le même, nous ne pourrions jamais le voir tout à fait de la même façon, car la manière dont nous sommes disposés vis-à-vis des choses, des êtres, des événements, varie sans cesse.

[14] Mais l'idée de cycle a pourtant quelque chose de rassurant. L'écrivain Jean-Louis Bory expliquait avant son suicide qu'il ne pouvait plus supporter la matérialisation de l'écoulement du temps par les montres à quartz, nouvelles à l'époque. Les aiguilles parcourant un cercle fermé sur lui-même étaient moins angoissantes que le défilement linéaire des secondes, des minutes et des heures dont le terme ne pouvait être que la mort.

[15] Platon, lui, insistait sur la permanence du temps comme totalité et unité : « Il eut donc l'idée de fabriquer une sorte d'image mobile de la durée des âges ; et, pendant qu'il met le ciel en ordre, il fabrique, à partir de cette durée qui reste dans l'unité, une image de la durée avançant selon le nombre, cela même que nous appelons le temps. » (Timée, 37d 5-8).

On peut aussi se demander si cette omniprésence du temps est la marque d'une universalité ou bien si elle reflète une juxtaposition de statuts particuliers. Tous ces temps qui apparaissent dans les équations sont-ils identiques ou bien distincts ? Le temps de la thermodynamique est-il le même que celui de la mécanique ou de la cosmologie ? Examinons ces questions à la lumière du problème de l'irréversibilité.

LA QUESTION DE LA (OU DES) FLECHE(S) DU TEMPS

Le temps subjectif a manifestement une structure dissymétrique. Le passé nous semble écrit, figé. Nous pouvons certes nous souvenir de lui mais nous ne pouvons plus le sentir passer. Quant au futur, si tendue que soit notre volonté, il nous paraît incertain, sans attache solide avec le réel, *a priori* multiple. Dans la vie courante, passé et futur ne sont pas équivalents.

Qu'en est-il de la réversibilité des phénomènes physiques ? Font-ils eux aussi la distinction entre le passé et l'avenir ? Même si cela a de quoi surprendre, ce problème, dit de la flèche du temps, n'est pas aujourd'hui résolu de manière satisfaisante : les développements modernes de la physique ont compliqué à la fois la question posée et les réponses qu'on lui donne. Le statut du temps n'a cessé de changer. A ses débuts, la physique a élaboré un concept de temps censé représenter (avec l'espace) le cadre naturel dans lequel les phénomènes se produisent. Plus tard, les nécessités mêmes de la physique amèneront, notamment avec la théorie de la relativité et la cosmologie, à un renversement de point de vue, en faisant voir que le temps et l'espace ne sont pas le contenant ou la forme des phénomènes, mais que ce sont au contraire les phénomènes physiques eux-mêmes qui les définissent et les déterminent.

C'est avec Galilée qu'est apparu pour la première fois le temps comme grandeur physique fondamentale, par quoi il faut entendre une grandeur quantifiable susceptible d'ordonner des expériences et de les relier mathématiquement[16]. Galilée étudiait la chute des corps par l'utilisation très astucieuse de plans inclinés. Il réalisa que si le temps, plutôt que par exemple l'espace parcouru, était choisi comme le paramètre fondamental, alors la chute des corps obéissait à une loi simple : la vitesse acquise est simplement proportionnelle à la durée de la chute. La dynamique moderne était née.

Newton, le premier, donna dans ses *Principia* une définition du temps de la mécanique, la faisant reposer sur un postulat assez complexe : le temps s'écoule uniformément, il est universel et absolu. Cette conception sous-tend, avec une efficacité remarquable, les principes de sa mécanique. Le mouvement des corps dans l'espace est décrit en donnant leurs positions à des instants successifs. Dans les calculs de trajectoires, le temps apparaît comme un paramètre externe de la dynamique, dont Newton a postulé qu'il s'écoule du passé vers le futur, selon un cours invariable. Mais les équations de Newton sont telles qu'on peut explorer avec les mêmes méthodes mathématiques le passé et l'avenir. En effet, lorsqu'on inverse le sens du temps, la loi fondamentale de la dynamique reste invariante. À toute évolution du passé vers l'avenir, elle associe l'existence d'une évolution symétrique de l'avenir vers le passé. Autrement dit, tout ce que la nature fait, elle pourrait le défaire selon le même processus. Les phénomènes newtoniens, dans les cas idéaux où il n'y a pas de frottement, sont donc réversibles. Le temps de Newton est scrupuleusement neutre. Il ne crée pas, il ne détruit pas non plus. Il ne fait que battre la mesure et baliser les trajectoires. Il coule identiquement à lui-même, imperturbable. Il trône hors de l'histoire. C'est un temps indifférent, sans qualité, sans accident, qui rend équivalents entre eux tous les instants.

LA THERMODYNAMIQUE DÉCOCHE LA PREMIERE FLÈCHE

La réversibilité des lois newtoniennes a été ressentie après coup comme un scandale par plusieurs savants du XIX^{e} siècle, notamment Ludwig Boltzmann, Willard Gibbs, Ernst Zermelo, Joseph Loschmidt, et plus récemment Ilya Prigogine. La grande majorité des événements dont nous sommes témoins ne sont-ils pas irréversibles ?

Mais comment rendre compte de cette irréversibilité par les lois physiques ? Au début du XIX^{e} siècle, Carnot démontra que la transformation de la chaleur en énergie mécanique était limitée par le sens unique dans lequel s'effectuent les transferts de chaleur (du chaud vers le froid uniquement), comme si la chaleur portait en elle une qualité spéciale en rapport avec l'irréversibilité. Ses *Réflexions sur la puissance motrice du feu*, publiées en 1824, contiennent les prémices du deuxième principe de la thermodynamique, énoncé sous sa forme définitive par Rudolph Clausius en 1865. Cette loi postule d'abord l'existence, pour tout système physique, d'une grandeur appelée entropie, fixée par l'état physique du système, et qui représente le degré de désordre présent dans le système. Le deuxième principe indique ensuite que la quantité d'entropie contenue dans un système isolé ne peut que croître lors d'un quelconque événement physique. C'est bien parce que l'entropie totale d'un morceau de sucre et d'une tasse de café non sucré est inférieure à l'entropie d'une tasse de café sucré que le morceau de sucre n'a pas d'autre choix que de se dissoudre dans la tasse. Ce phénomène est irréversible : le sucre en train de se dissoudre au fond de la tasse de café ne reprendra jamais sa forme parallélépipédique ni d'ailleurs sa blancheur. Le deuxième principe semble bien s'accorder avec

[16] Jusqu'à l'époque de Galilée, ce que nous appelons « temps » était centré avant tout sur des communautés humaines. Le temps servait essentiellement aux hommes de moyen d'orientation dans l'univers social et de mode de régulation de leur coexistence, mais il n'intervenait pas de façon explicite et quantitative dans l'étude des phénomènes naturels (voir sur ce point le livre de Norbert Elias, *Du temps*, Paris, Fayard, 1997).

notre sensation d'une direction bien établie du sens des phénomènes. Du moins à première vue...

Car, comme toujours, il faut regarder les choses de plus près. Parmi les équations de la physique, il y a celles qui sont fondamentales, au sens où elles rendent compte des comportements de base de la matière et, en principe, expliquent tout. On les qualifie de microscopiques, car elles concernent essentiellement les « briques élémentaires », atomes ou autres molécules, à partir desquelles la matière sous toutes ses formes est censée se construire. Le point important ici est que toutes les équations microscopiques de la physique sont réversibles : lorsqu'on y fait s'écouler la variable temps dans un certain sens, par exemple vers le futur, les équations décrivent un certain mouvement des particules ; si l'on fait s'écouler la variable temps dans l'autre sens, le mouvement calculé est le même que précédemment, mais décrit en sens inverse. Aucun de ces deux mouvements ne peut être dit plus physique ou moins physique que l'autre. C'est pour cela que l'on dit que les équations microscopiques sont réversibles. Mais à côté de ces équations microscopiques, il y en a d'autres, qui résument un comportement plus global de la matière. Ces équations, dites macroscopiques, décrivent des phénomènes qui se produisent à une échelle proche de la nôtre. Elles sont irréversibles. Par exemple, l'équation de la chaleur établie par Joseph Fourier en 1811 indique que celle-ci ne peut circuler qu'en sens unique, du chaud vers le froid, et non l'inverse.

Si l'on admet qu'un comportement global n'est jamais que l'assemblage d'un grand nombre d'événements élémentaires, alors les équations macroscopiques devraient pouvoir être déduites des équations microscopiques. Pourtant, les unes sont réversibles, les autres non. Par quoi raccorder les deux bouts de la chaîne ? Comment comprendre l'existence même de l'entropie, fonction dissymétrique par rapport au temps de l'état macroscopique du système, alors que l'on sait que l'évolution microscopique du matériau est symétrique ? Voulant approfondir cette question, Ludwig Boltzmann tenta de trouver un lien entre la mécanique newtonienne et le second principe de la thermodynamique. Comme il est impossible d'intégrer rigoureusement les comportements d'un très grand nombre de particules, Boltzmann eut recours aux lois de la statistique, abandonnant le calcul explicite des trajectoires pour celui des probabilités. Il constata en 1872 qu'on pouvait construire une grandeur mathématique appelée H, fonction des positions et des vitesses des molécules du gaz, ayant une propriété remarquable : sous l'influence des collisions entre les molécules, elle ne peut que diminuer au cours de l'évolution vers l'équilibre, ou rester constante si le gaz est déjà à l'équilibre (auquel cas tout se passe comme si le temps ne s'écoulait plus). Elle est donc, au signe près, l'analogue de l'entropie. Ainsi, l'agrégation statistique des équations réversibles de la dynamique des particules conduit-elle à une équation macroscopique irréversible. Cela conduisit Boltzmann à interpréter l'irréversibilité comme résultant d'une évolution d'un macro-état peu probable vers un macro-état plus probable. La croissance de l'entropie d'un système isolé exprimerait simplement la tendance moyenne, manifestée par ce système, d'évoluer vers des états de plus en plus probables à l'échelle des molécules, c'est-à-dire vers des états de plus en plus désordonnés. La flèche thermodynamique du temps ne serait autre que celle qui va de l'ordre vers le désordre.

Ainsi l'irréversibilité semble-t-elle surgir au bout des calculs. Mais ces calculs interprètent l'irréversibilité comme n'étant qu'une réalité statistique propre aux systèmes macroscopiques, c'est-à-dire contenant un très grand nombre de degrés de liberté. Au niveau microscopique, les phénomènes restent, eux, réversibles. L'irréversibilité ne serait donc qu'une propriété émergente caractéristique des seuls systèmes complexes. Elle serait de fait, non de principe.

De là à dire que le temps lui-même n'est qu'illusion, il n'y a qu'un pas que d'aucuns ont franchi, et non des moindres. Einstein lui-même a écrit dans sa correspondance privée (lettre écrite le 21 mars 1955 après la mort de son ami Michele Besso à la famille de ce dernier) que « pour nous autres, physiciens convaincus, la distinction entre passé, présent et futur n'est qu'une illusion, même si elle est tenace ». Même si son point de vue sur la question n'a pas toujours été aussi radical (peut-être voulait-il seulement consoler les proches du défunt ?), il reste qu'Einstein espérait bien éliminer la notion d'irréversibilité en ramenant la physique à une pure géométrie, c'est-à-dire à une forme sans histoire[17].

D'autres physiciens, en revanche, jugent impossible de soutenir que l'irréversibilité procède de notre ignorance des « détails fins » ou de notre subjectivité humaine. Quelque chose d'essentiel, pensent-ils, a dû échapper à la physique. Ilya Prigogine, qui défend ce point de vue, confesse volontiers l'influence cruciale qu'eut sur lui la phrase de Henri Bergson : « Le temps est invention, ou il n'est rien du tout"[18] (le mot invention est à prendre ici au sens de nouveauté créatrice, non au sens de chimère). Selon lui, l'irréversibilité macroscopique est l'expression d'un caractère aléatoire du niveau microscopique. Loin d'être une affaire de point de vue, elle serait inhérente à la nature. Il écrit : « La description statistique introduit les processus irréversibles et la croissance de l'entropie, mais cette description ne doit rien à notre ignorance ou à un quelconque trait anthropocentrique. Elle résulte de la nature même des processus dynamiques »[19]. Ainsi, au lieu de dire qu'il n'y a pas de flèche du temps, mais que le niveau macroscopique crée l'illusion qu'il y en a une, Prigogine proclame qu'il y a une flèche du temps, mais que le niveau microscopique crée

[17] A la fin de sa vie, Einstein semble avoir changé d'avis. En 1949, Kurt Gödel proposa un modèle cosmologique dans lequel il était possible de voyager vers son propre passé. Einstein ne fut pas convaincu, reconnaissant qu'il était incapable de croire que l'on puisse « télégraphier vers son passé » (voir Ilya Prigogine, *La Fin des certitudes*, Paris, Editions Odile Jacob, 1996).

[18] H. Bergson, *Évolution créatrice* (1916), Paris, PUF, 1970, p. 341.

[19] Ilya Prigogine, *La Fin des certitudes*, Paris, Éditions Odile Jacob, 1996, p. 126.

l'illusion qu'il n'y en a pas. A ce sujet, les controverses sont nombreuses. Il reste en particulier à déterminer précisément comment la flèche du temps parviendrait à percer l'harmonieux édifice de la physique classique, si notoirement indifférent au message d'irréversibilité qu'elle porte. Le débat est notablement compliqué par le fait que la physique classique n'est pas seule en cause. La physique moderne, c'est aussi la relativité restreinte, la relativité générale, la mécanique quantique, la théorie des champs, la cosmologie, bref, de nombreux formalismes qui se complètent, voire se contredisent. Il nous revient de mettre un peu d'ordre dans ce foisonnement, au moins à propos du temps.

TEMPS RELATIVISTES

Dans les premières années de ce siècle, Einstein tente de concilier l'électromagnétisme de Maxwell et le principe de relativité de la mécanique. Il trouve la solution dans une redéfinition de l'espace et du temps, introduisant le concept d'espace-temps, en remplacement des concepts jusqu'alors séparés d'espace et de temps. Si l'on change de référentiel galiléen dans l'espace-temps, le temps se transforme en partie en espace, et l'espace se transforme en partie en temps. Conséquence philosophique : le temps perd son idéalité newtonienne, il cesse d'être extérieur à l'espace et se met à dépendre de la dynamique. Conséquence pratique : les horloges, lorsqu'elles se déplacent en mouvement rapide dans l'espace, ralentissent le rythme de leurs battements. Ce ralentissement des horloges, qui mesure l'élasticité du temps de la relativité, est couramment observé sur les particules élémentaires instables, par exemple sur les muons. Les muons sont des sortes d'électrons lourds produits naturellement en haute atmosphère par le rayonnement cosmique, ou artificiellement lors de collisions entre particules accélérées à haute énergie. Leur durée de vie moyenne τ vaut 2,2 microsecondes. Toutefois, la théorie de la relativité implique, et l'expérience établit, que l'intervalle de temps mesuré entre la création d'un muon et sa désintégration ne coïncide avec la durée de vie propre τ que si ce muon naît et meurt en un même point de l'espace. Autrement dit, cela ne vaut que s'il est immobile. Sinon, sa durée de vie effective (et donc la longueur du trajet qu'il parcourt) dépend de son énergie ou, si l'on préfère, de sa vitesse : plus il va vite et plus il dure longtemps, au point que si sa vitesse est proche de celle de la lumière dans le vide, il a tout loisir de se manifester pendant un temps bien supérieur à τ.

La théorie de la relativité oblige à modifier bien d'autres conceptions à propos du temps. Notamment, la notion de simultanéité cesse d'être absolue : des événements qui sont dans le futur pour tel observateur sont dans le passé pour tel autre et dans le présent pour un troisième. En d'autres termes, ce qui m'est présent à un certain instant n'existe plus ou pas encore pour quelqu'un d'autre en déplacement par rapport à moi. Le mot maintenant devient ambigu. Il existe désormais autant d'horloges fondamentales qu'il y a d'objets en mouvement uniforme. On ne peut pas les synchroniser. Si l'on ajuste leurs cadrans à un certain moment, les heures indiquées ne coïncident plus quelques instants plus tard. Chaque observateur a l'impression que le temps indiqué par les horloges autres que la sienne propre est dilaté en raison, précisément, du ralentissement des horloges. Le temps n'a donc plus d'étalon. Mais le principe de causalité est, quant à lui, conservé : si, pour un observateur, un événement A est antérieur à un événement B et tel qu'un signal lumineux a le temps de partir de A pour atteindre B, alors il en est de même pour n'importe quel autre observateur. Passé et futur gardent un caractère absolu. Passant d'un référentiel galiléen à un autre, on peut, selon leur vitesse relative, modifier le rythme du cours du temps mais on ne l'inverse jamais. Il faudrait pour cela dépasser la vitesse de la lumière, ce que précisément la théorie de la relativité interdit[20].

Venons-en maintenant à la gravitation et à ce qui semble être aujourd'hui sa bonne théorie, la relativité générale d'Einstein. Si l'on en croit ses principes, la gravitation n'est pas une force s'exerçant entre les différents contenus matériels de l'univers. Elle est plutôt une propriété géométrique de l'univers lui-même. Cette insertion de la gravitation dans l'espace-temps lui-même l'oblige à se déformer, à se cabosser, autrement dit à devenir courbe. C'est au sein de cet espace-temps courbe que l'espace, le temps et aussi la matière ont des intrigues fort compliquées. Les équations d'Einstein prévoient en effet que la densité de masse et d'énergie conditionne la structure même de l'espace-temps et que c'est cette structure (qu'on appelle la métrique de l'espace-temps) qui, en retour, détermine la dynamique et la trajectoire des objets contenus dans l'univers. Dans un tel contexte, non seulement la vitesse des observateurs, mais aussi la masse (l'intensité du potentiel gravitationnel) influent directement sur la vitesse d'écoulement du temps. Par ce biais, le temps est maintenant soumis aux phénomènes.

On pourrait s'attendre à voir la cosmologie confirmer la vision d'un espace-temps statique telle que la prône la relativité restreinte. Il n'en est rien. La plupart des physiciens s'accorde aujourd'hui sur des modèles d'univers particuliers, dits de Big Bang, au sein desquels règne un temps cosmologique, lié à l'expansion de l'univers. Sans pour autant s'identifier au temps absolu de Newton, ce temps cosmologique partage avec lui la propriété d'être universel : des observateurs qui ne sont soumis à aucune accélération et ne subissent aucun effet gravitationnel mutuel peuvent en effet synchroniser leurs montres, et celles-ci resteront en phase tout au long de l'évolution cosmique. De plus, comme le temps de Newton, ce temps cosmologique s'écoule toujours dans le même sens, et c'est ce qui permet de l'utiliser pour retracer l'histoire de l'univers.

Quant à l'origine du temps cosmologique, à l'instar de celle de l'univers lui-même, elle se perd dans les brumes

[20] Un voyage dans le temps impliquerait inévitablement un écart entre le temps et le temps, c'est-à-dire entre le temps extérieur et le temps « personnel » d'un voyageur particulier.

aurorales de l'univers primordial[21]. En effet, admettre le modèle du Big Bang, pour un physicien, c'est reconnaître l'impossibilité d'extrapoler indéfiniment vers le passé à l'aide des lois de la physique. Une telle extrapolation conduirait infailliblement à une impasse, c'est-à-dire à un état de l'univers dans lequel les lois de la physique telles que nous les connaissons entreraient en conflit les unes avec les autres, à cause de l'incompatibilité des principes de la physique quantique avec ceux de la relativité générale. Cette situation rendant tout calcul vain et toute conjecture chimérique, nous ne savons rien de l'origine de l'univers, rien non plus de l'origine du temps, que le terme origine soit pris ici au sens chronologique ou au sens explicatif.

Nous savons aujourd'hui que l'univers a eu une histoire. Est-ce à dire qu'il a eu un début ? La question de l'origine surgit ainsi dès que l'on évoque l'idée d'un commencement. Aussitôt, elle nous dépasse. Par exemple, nous sommes incapables de savoir si l'univers a eu un prélude temporel : est-il apparu dans un temps lui préexistant ou bien son émergence a-t-elle été contemporaine de celle du temps ? Peut-on concevoir le temps sans le changement ? Pour qu'on puisse parler de changement, il faut que quelque chose change, et ce quelque chose, c'est déjà un univers... !

TEMPS QUANTIQUE(S)

Venons-en maintenant à la mécanique quantique. Comme nous l'avons vu, pour décrire l'état d'un système quantique, par exemple une particule, on utilise un objet mathématique que l'on appelle la fonction d'onde du système. En général, cette dernière est une somme de plusieurs termes distincts, chacun des termes correspondant à une valeur possible d'une propriété physique du système (sa position, son énergie...). Une des originalités troublantes de la physique quantique vient de ce qu'elle postule que lorsque l'on fait une mesure sur le système, par exemple une mesure de son énergie, il se produit une modification brutale de la fonction d'onde : un seul terme de la somme qu'elle contient subsiste, correspondant à la valeur de l'énergie qui a été effectivement mesurée. On dit que la fonction d'onde a été réduite par la mesure. D'après l'interprétation courante de la mécanique quantique, le choix du terme de la somme qui subsiste après cette réduction est parfaitement aléatoire, la fonction d'onde avant la mesure permettant seulement de calculer la probabilité que telle ou telle valeur soit sélectionnée.

Qu'en est-il alors de la question du temps en physique quantique ? Pour simplifier, nous ne retiendrons de son formalisme que l'équation de Schrödinger, qui est valable tant que les vitesses restent faibles par rapport à celle de la lumière. Elle permet de calculer l'évolution au cours du temps de la fonction d'onde associée à toute particule. Cette équation est parfaitement réversible, et elle est tout aussi parfaitement déterministe. Le temps qu'elle manipule est donc *a priori* le temps newtonien[22]. Mais si une opération de mesure est faite sur le système, un seul des résultats de mesure *a priori* possibles se réalise effectivement. La description mathématique du système est modifiée, de sorte qu'on peut dire que l'acte de mesure implique la production irréversible d'une « marque » sur le système, que l'équation de Schrödinger ne décrit pas. Notons que la flèche qui apparaît là est plutôt étrange, puisque ce sont les mesures faites sur les systèmes qui interviennent dans la création de l'irréversibilité.

En matière de temps, la physique des particules a elle aussi son mot à dire. Les théoriciens de cette discipline ont très habilement su utiliser toute la richesse du concept de symétrie. Chacun comprend bien par exemple que l'image dans un miroir d'une expérience de physique n'est pas identique à l'expérience elle-même : gauche et droite sont inversées. Mais les physiciens ont longtemps cru que cette image correspondait *aussi* à une expérience de physique, réalisable comme l'autre en laboratoire. C'est cette invariance de la physique par réflexion dans un miroir qu'on appelle la conservation de la parité. L'opération qui, dans le formalisme, correspond à la réflexion dans un miroir, s'appelle en effet la parité. On la note P. Elle consiste à inverser les coordonnées spatiales des particules. On peut démontrer que le fait de dire d'une théorie qu'elle conserve la parité revient à dire qu'aucune expérience qui relève de cette théorie ne permettrait de donner un sens absolu aux notions de droite et de gauche.

Il existe d'autres opérations de symétrie que la parité. Par exemple, dans une réaction faisant intervenir des particules et des antiparticules, on peut par la pensée remplacer chaque particule par son antiparticule et *vice versa*. Cette permutation de la matière avec l'antimatière s'appelle la conjugaison de charge. On la note C. Une autre opération, notée T, consiste à inverser le sens du temps. Appliquée à un processus quelconque, cette opération revient à dérouler le processus dans le sens opposé à celui où il a effectivement eu lieu. Sous peine de perdre leurs fondements les mieux ancrés (en parti-

[21] Les scientifiques ont des difficultés particulières avec l'idée d'origine, que celle-ci concerne l'univers dans son ensemble, la matière, le temps, la vie, l'homme. Car, en tant que scientifiques, ils s'occupent du comment du monde, non du fait qu'il soit. La science, pour se construire, a besoin d'un réel, c'est-à-dire d'un « déjà-là ». Or l'origine ne fait précisément pas partie du « déjà-là ». Elle correspond à l'émergence d'une certaine chose en l'absence de cette même chose (l'origine suppose la non-présence dans la mise en présence-même). Cette singularité-là, qui fait passer du néant à l'être, la science n'est pas capable de la saisir, et a beaucoup de difficulté à lui donner un statut.

[22] De cela découle une différence radicale entre temps quantique et temps relativiste : le temps et l'espace jouent des rôles symétriques dans la théorie de la relativité tandis qu'ils sont tout à fait découplés en physique quantique non relativiste. La position d'une particule dans l'espace est une grandeur observable, c'est-à-dire qu'il lui correspond un opérateur hermitien. Mais aucun opérateur n'est associé à la date d'un événement. Le temps n'est pas une grandeur observable au sens de la physique quantique. On ne sait pas aujourd'hui construire un « opérateur temps », malgré les diverses tentatives qui ont pu être faites.

culier le principe de causalité, qui en définitive rend nécessaire l'existence de l'antimatière), toutes les théories de la physique prédisent l'invariance des lois de la dynamique par l'opération globale CPT. Cela signifie que si l'on passe à l'envers le film de l'image dans un miroir de n'importe quel phénomène dans lequel on a échangé particules et antiparticules, on observe un phénomène aussi probable que celui dont on est parti, même s'il est différent. Cette invariance est notamment vérifiée par le fait que la masse et la durée de vie des particules instables sont rigoureusement égales à celles de leurs antiparticules. Si l'on appliquait globalement l'opération CPT à notre monde, on obtiendrait un monde qui aurait une autre allure. Par exemple, chaque proton y serait remplacé par un antiproton d'hélicité opposée. Il n'empêche que les équations régissant ce nouveau monde resteraient identiques à celles qui valent dans le nôtre. L'invariance ne s'applique pas au monde lui-même, mais aux équations qui décrivent la dynamique qui s'y produit.

À leur grande surprise, les physiciens découvrirent en 1957 que la loi de conservation de la parité n'est pas respectée par l'interaction nucléaire faible. L'image dans un miroir de tels processus ne correspond pas à un phénomène qu'on puisse reproduire.

Ayant constaté que l'invariance par parité n'était pas respectée par l'interaction faible, on démontra que cette dernière violait aussi l'invariance par conjugaison de charge, d'une façon telle que la symétrie globale PC était, elle, préservée. Arrivé à ce point du raisonnement, on pouvait conclure que l'invariance par PC, combinée à l'invariance PCT, impliquait l'invariance par T. Ce résultat rassurant ne tint que quelques années. En 1964, une expérience révéla (à la surprise générale !) que l'invariance par PC est elle aussi brisée, même si ce n'est que très légèrement, lors de la désintégration de particules étranges qu'on appelle les kaons neutres. Mais alors, PCT étant toujours conservée, si PC ne l'est pas en l'occurrence, c'est que T ne l'est pas non plus. Trente ans après qu'on l'ait découverte, l'origine profonde de cette légère brisure de la symétrie temporelle passé-futur demeure mystérieuse[23].

Chacun des systèmes conceptuels de la physique donne au temps un statut original et particulier. Il n'y a visiblement pas d'universalité du concept de temps, ni d'unité théorique autour de lui. Pour ce qui est de la question de l'irréversibilité, nous avons vu apparaître des bribes de flèche (thermodynamique, cosmologique, quantique), sans pouvoir mettre le doigt sur une flèche unique qui vaudrait pour la physique tout entière. Il semble de toute façon que ces deux façons de penser, celle qui se fonde sur l'histoire et le temps, et celle qui se fonde sur l'éternité et l'absence de temps, soient deux composantes contradictoires mais inséparables de notre effort pour comprendre le monde. Nous ne pouvons pas expliquer le changeant sans le ramener au permanent, et nous ne savons pas raconter la durée sans imaginer qu'elle monnaie quelque invariance.

Quant aux liens entre le temps du monde et celui de la conscience, ils sont à chercher à la couture de la matière et de la vie. Le temps mathématisé du physicien n'épuise manifestement pas le sens du temps vécu, pas plus que le temps vécu ne donne l'intuition de toutes les facettes du temps physique. A force de schématisation, la physique aurait-elle laissé échapper quelques-unes des propriétés fondamentales du temps ? C'était le point de vue de Bergson, convaincu que la physique – et l'intelligence discursive en général – se faisaient une représentation fausse du temps. Plutôt que d'observer le temps qui s'écoule, l'esprit scientifique se préoccuperait de noter des coïncidences ; il substituerait à la durée un schéma simpliste, celui d'un temps à une dimension, homogène, constitué seulement d'instants qui se succèdent à l'identique. Ce faisant, expliquait Bergson, il oublierait de regarder en face la véritable nature de la durée, qui est invention continue, apprentissage perpétuel, émergence ininterrompue de nouveauté. Pourtant, qu'est-ce que cette durée pure qu'invoque Bergson, et comment la saisir ? Bergson lui-même reconnaissait la difficulté : « Nous éprouvons une incroyable difficulté à nous représenter la durée dans sa pureté originelle »[24]. Ni la science, ni le langage, ni même la saisie des idées par une conscience délivrée de l'obsession de l'espace ne peut réussir à en rendre compte. Gaston Bachelard prit acte de cette impuissance, dans *L'intuition de l'instant* : « Quand nous avions encore foi en la durée bergsonienne et que, pour l'étudier, nous nous efforcions d'en épurer et par conséquent d'en appauvrir la donnée, nos efforts rencontraient toujours le même obstacle : nous n'arrivions jamais à vaincre le caractère de prodigue hétérogénéité de la durée (...). Nous aurions voulu un devenir qui fût un vol dans un ciel limpide, un vol qui ne déplaçât rien, auquel rien ne fît obstacle, l'élan dans le vide, bref le devenir dans sa pureté et dans sa simplicité, le devenir dans sa solitude »[25]. Mais le philosophe avait beau analyser des fragments de moins en moins étendus, « c'était toujours le même échec : la durée ne se bornait

[23] Une expérience du CERN, appelée CPLEAR, vient de livrer un résultat capital à ce sujet (octobre 1988). Elle a mis en évidence, de façon directe, une faible violation de la symétrie temporelle au sein d'un système microscopique particulier, celui formé par deux particules instables découvertes dans les années 1950 : l'une s'appelle le « kaon neutre », l'autre est son antiparticule, c'est-à-dire « l'antikaon neutre ». Il est établi depuis longtemps qu'un kaon neutre se transforme au cours du temps en sa propre antiparticule, qui à son tour se retransforme en kaon neutre. Ce que l'expérience du CERN vient de mettre en évidence, c'est que la vitesse à laquelle un kaon neutre se transforme en son antiparticule n'est pas exactement la même que celle du processus inverse, contrairement à ce que la symétrie temporelle prévoit. C'est la première fois qu'est mesurée *directement* une différence entre un processus microscopique et le processus inverse. Outre que l'origine de cette différence reste énigmatique, il reste à interpréter la portée de ce résultat et à comprendre son lien avec la problématique générale de la flèche du temps (A. Angelopoulos *et al.*, *First direct observation of time-reversal non-invariance in the neutral-kaon system*, à paraître dans Physics Letters B).

[24] H. Bergson, *Essai sur les données immédiates de la conscience*, *Œuvres*, PUF, Paris, 1970, p. 71.

[25] G. Bachelard, *L'intuition de l'instant*, Paris, Gonthier-Médiations, 1973, p. 32.

pas à durer, elle vivait ! Si petit que soit le fragment considéré, un examen microscopique suffisait pour y lire une multiplicité d'événements ; toujours des broderies, jamais l'étoffe ; toujours des ombres et des reflets sur le miroir mobile de la rivière, jamais le flot limpide »[26]. Il faut donc abandonner l'espoir de saisir un continu à l'état pur, ce à quoi invite d'ailleurs la théorie de la relativité qui met en avant l'idée d'événement, c'est-à-dire de point dans l'espace-temps, sans toutefois révéler comment les tic-tac répétitifs et esseulés qui constituent le temps monotone des physiciens peuvent devenir la pâte du temps de la vie.

[26] *Ibid.*, p. 33.