

Temps à devenir, à propos de l'histoire du temps

Ilya Prigogine



attribution - pas d'utilisation commerciale - partage dans les mêmes conditions

Ici, il conviendra de rappeler aux sceptiques et aux petits penseurs que le libre partage de contenu va au-delà du téléchargement illégal de films hollywoodiens. Une idée que les presses de Gutenberg n'ont pas su satisfaire et qui ne se veut pas croisade de missionnaires mais qui, par des conditions nouvelles, devient possible. Bien que dans notre cas il ne s'agisse que de simples « petits projets d'art », si l'information était libre, les vaccins contre le sida ne seraient pas réservés à une élite blanche et les voitures qui emmènent vos enfants à l'école auraient depuis longtemps cessé d'être une catastrophe pour leur avenir. Des parasols à l'envers permettent à tout le monde de profiter du soleil et pas à une minorité privilégiée d'être à l'ombre et, de toute manière, les parasols n'ont jamais protégé qui que ce soit d'un astéroïde.

Temps à devenir, à propos de l'histoire du temps

Vous venez de voir ce film sur Stephen Hawking¹ et vous devez sans doute, comme moi quand je l'ai vu, être très émus, puisqu'il s'agit d'un destin, brillant certainement, mais tragique tout de même. On ne peut qu'évoquer l'exemple de Beethoven, devenant sourd, devant sans doute créer des mécanismes mentaux différents pour pouvoir écrire la musique, en fait peut-être la plus originale qu'il ait écrite, à la fin de sa vie.

De même, Stephen Hawking a dû développer des mécanismes mentaux nouveaux pour pouvoir faire face à son infirmité, et ce qui me frappe encore davantage, c'est qu'il ne s'est pas laissé prendre par le désespoir, qu'il a continué à travailler; c'est vraiment le triomphe de l'esprit sur la matière.

D'autres pensées me viennent à l'esprit, notamment sur les progrès de la technologie... Si son infirmité était arrivée il y a 30, ou 40 ans, Hawking aurait été isolé du monde tandis que maintenant la nouvelle technologie lui permet de participer à la vie sociale. De toute manière, c'est un exemple merveilleux de créativité dans des conditions difficiles.

Là, je voudrais insister sur le fait qu'on ait souvent des idées un peu étroites sur la créativité. Tout le monde sait bien que, après la mort de Mozart, il n'y aura pas un second « Don Juan »; après la mort de Michel-Ange, il n'y aura pas une seconde chapelle Sixtine. Mais on pense quelquefois que la science est un processus presque automatique: par exemple, s'il n'y avait pas eu Einstein, il y aurait eu quelqu'un d'autre qui aurait découvert la relativité générale. Il n'y a rien de moins certain! Au contraire, je pense que s'il n'y avait pas eu Einstein, nous n'aurions peut-être pas la relativité sous sa forme actuelle. Je crois que, spécialement, vous voyez dans l'œuvre de Hawking² cette créativité, cet effort pour atteindre une certaine forme de vérité, c'est certainement très émouvant.

1 *A Brief History of Time*, film de Errol Morris sorti en 1991.

2 Hawking, Stephen, *Une brève histoire du temps, du big bang aux trous noirs*, traduit de l'anglais par Isabelle Naddeo-Souriau, Flammarion, 1989.

Alors que le livre se veut une explication de la cosmologie à un public non averti, le film est plutôt centré sur la biographie de Stephen Hawking.

Je suis d'accord avec Paul Valéry, quand il écrit qu'il est très difficile de distinguer la créativité scientifique et la créativité artistique. Il me semble que pour le théoricien, pour le créateur en musique, dans les arts, en littérature, la créativité est associée à ce qui « résiste ». On essaie d'aller, comme disait Valéry, du désordre de l'esprit à l'ordre, vers un certain ordre. Que l'ordre s'appelle les « Demoiselles d'Avignon », les « Montres molles » de Dalí, que cet ordre s'appelle le « Rayonnement des trous noirs » de Hawking importe peu. L'esprit qui préside à la créativité, c'est toujours de réunir des choses qui apparemment sont différentes et d'en faire une synthèse.

Dans le cas du rayonnement des trous noirs de Hawking, il s'agissait de faire une synthèse très vaste, puisque ce rayonnement résulte à la fois de la relativité, de la mécanique quantique et de la mécanique statistique. C'est une magnifique synthèse !

Cela dit, quel est le sens de ce film sur Hawking ? Qu'est-ce qu'il veut nous transmettre, au-delà de la technicité, des trous noirs et du Big Bang ?

Eh bien ! je pense qu'il y a deux messages. Tout d'abord, que nous cherchons à atteindre la certitude que la science essaie d'atteindre la certitude. Et que nous sommes même près de l'atteindre. Nous retrouvons la même affirmation, à la fois dans le livre de Hawking et dans le film, selon laquelle quand nous découvrirons la théorie finale complète, elle sera un jour compréhensible à tous. Nous aurons alors la réponse à la question de l'origine de l'univers. Ce sera le triomphe ultime de la raison humaine. À ce moment, nous connaissons la pensée de Dieu. Donc, à ce moment, nous aurons atteint la certitude, puisque je pense qu'il est naturel d'associer Dieu à la certitude. C'est le premier message : nous allons atteindre la certitude, et cela même bientôt.

La seconde idée, assez proche, c'est que le temps en tant que déroulement successif naturel n'existe pas. L'univers est, mais ne « devient » pas. L'apparente flèche du temps est donc une illusion qu'il faut dépasser, éliminer. Cette idée revient comme un leitmotiv dans le film, non seulement dans les paroles de Hawking, mais aussi dans les paroles de commentateurs de la pensée de Hawking.

Ainsi, John Wheeler, un physicien célèbre, affirme dans ce film que l'idée sur la

cosmologie la plus simple, la plus naturelle, c'est que l'univers naît très petit, puis devient grand, puis redevient petit, puis passe par le « Big Crunch », va redevenir grand et ainsi de suite indéfiniment³.

Qu'est-ce que c'est le temps, alors? *Le temps comme succession, comme irréversibilité serait une illusion*. On recommence, on recommence... Et je dois dire que Roger Penrose⁴ dans ses commentaires va encore plus loin, puisqu'il – et là c'est le summum – nous dit que le futur pourrait influencer le passé et que, peut-être que si nous renaissions un jour, nous renaîtrions dans la peau de quelqu'un qui a vécu avant nous. Je ne me propose pas de faire de commentaires là-dessus parce que je veux garder un certain sérieux mais, enfin, tout cela tend à dire: « Le temps est illusion. L'univers est. » À mon sens, c'est une conception paradoxale.

Mais alors, comment se fait-il qu'on soit arrivé à une telle conception, qui pourtant est en opposition complète avec notre expérience de l'existence? Notre expérience de l'existence est basée sur le temps, sur la différence entre le passé et le futur. C'est notre dimension existentielle par excellence. Nous devenons, nous ne sommes pas!

Nous devenons quand nous sommes enfants, nous devenons quand nous sommes adultes, toute notre vie, nous devenons! Et partout autour de nous, le temps, en tant que succession, joue un rôle. Tout à l'opposé de cette affirmation de Hawking selon laquelle l'univers ne devient pas, l'univers est.

Pour comprendre la signification d'une telle affirmation, il faut se reporter à un élément essentiel de la physique et même de la conception occidentale des sciences, qui est la notion de loi de la nature. Considérons, par exemple, la loi de Newton, la loi la plus simple, la plus fondamentale, qui a servi de modèle à toutes les lois qui ont suivi et qui dit que la force est proportionnelle à l'accéléra-

3 John Wheeler (1911-2008) était un physicien théoricien, inventeur du nom de trou noir. Il a développé une théorie de l'univers cyclique selon laquelle après un certain temps d'expansion, il se contracterait (Big Crunch) jusqu'à renaître à nouveau (Big Bang). Des univers se succéderaient, chacun différent avec éventuellement d'autres lois physiques. Le notre, n'en serait qu'un parmi des précédents et d'autres à venir.

4 Roger Penrose (1931) est un physicien et mathématicien connu pour sa contribution à la théorie de la relativité générale et la cosmologie. Il a été collaborateur de Hawking avec qui il a co-écrit *The Nature of Space and Time*, Princeton University Press, 1996.

tion. Une fois qu'on connaît cette loi, on est en face des deux éléments dont parle Hawking dans un contexte plus moderne : la certitude et le caractère intemporel. La certitude, parce que si vous connaissez les conditions initiales, vous pouvez prédire ce qui va arriver ou ce qui est arrivé dans le passé ; et, comme il s'agit de l'accélération, c'est-à-dire d'une dérivée seconde dans le temps, il n'y a pas de différence entre futur et passé. Pour nous, il y a une différence, mais pour la loi de Newton, il n'y en a pas. Donc du moment que vous êtes dans la conception mécanique classique, donc newtonienne, il n'y a pas de différence entre le passé et le futur.

Il y a donc là deux idées : la certitude et l'idée de symétrie entre futur et passé, donc une conception essentiellement statique. À tout moment, tout est déjà là en puissance. Il est vrai que cette idée d'un univers statique a survécu sous une autre forme à la révolution quantique et même à la révolution einsteinienne. J'y reviendrai.

D'où nous vient cette notion de loi de la nature ? Il est très intéressant d'étudier l'histoire et de noter que dans la formulation de cette notion de loi, la théologie a joué un rôle important. Celui qui en était le plus conscient, qui l'a écrit et répété, c'est Leibniz. Leibniz a insisté sur le fait que le concept de loi de la nature est quelque chose d'extrêmement particulier à la civilisation occidentale. En Chine, il n'y a pas eu de formulation comparable ; Granet, le grand sinologue français, aujourd'hui décédé, disait de la Chine : « Ni loi, ni Dieu ; ni Dieu, ni loi. »⁵

En Chine, il n'y avait pas de formulation de « lois » de la nature. Il y a la conscience d'une forme d'harmonie universelle qu'on peut étudier qualitativement, mais il n'y a pas quelque chose de comparable à une loi dans le sens occidental d'une nécessité. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle les Chinois qui ont fait des découvertes très importantes au point de vue expérimental n'ont jamais pensé à mesurer la durée de la chute d'une pierre, parce qu'ils se disaient : quel intérêt y a-t-il ? Un jour il pleut, alors peut-être que ça ira plus lentement, un autre jour il y a du vent, alors quelle importance ? Tandis que, au contraire, partant de l'idée d'un Dieu rationnel, d'un Dieu législateur, on peut espérer comprendre la nature

5 Marcel Granet, *La pensée chinoise*, Paris, Albin Michel, (1^e édition 1934), 1988, pp.475-476.

de Dieu à travers les lois de la nature. Et comprendre Dieu à travers les lois de la nature est l'objet de la science d'après Leibniz. Comprendre Dieu à travers la nature, c'est comprendre la nécessité qui se manifeste dans la nature et se rapprocher du point de vue divin.

Or, pour Dieu, évidemment, il n'y a pas de passé, il n'y a pas de futur. Nous parlons de Dieu, non pas de celui de Teilhard de Chardin, mais du Dieu tel qu'il était conçu au XVII^e siècle, du Dieu de Leibniz, d'un Dieu omniscient, omnipuissant et pour lequel le temps ne signifie rien. Et dès lors, le scientifique, dans sa recherche orientée vers la connaissance divine, devait lui aussi éliminer le temps. Dès lors, la preuve qu'une science était satisfaisante, c'est que le temps comme succession naturelle n'y jouait pas de rôle; l'élimination du temps devenait ainsi une preuve de la perfection de notre connaissance.

L'idée de loi est basée sur l'idée de certitude. L'idée de certitude est de nouveau une des caractéristiques de la science occidentale. Elle a été formulée, peut-être pour la première fois, d'une manière claire – car il y a toujours des origines plus anciennes – par Descartes. Il y a un livre que je recommande chaleureusement à tous ceux qui s'intéressent à l'idée de certitude, le livre *Cosmopolis* de Stephen Toulmin, un philosophe américain, dans lequel il analyse l'origine de l'idée de certitude développée par Descartes.

C'est une histoire très intéressante et j'aimerais bien écrire, un jour, un petit livre que j'appellerais non pas « une brève histoire du temps », mais « une très brève histoire de la certitude », parce que c'est très intéressant de voir comment l'idée de certitude est apparue. Et aussi dans quel contexte culturel et social l'idée de certitude est devenue centrale comme c'est le cas dans l'œuvre de Hawking.

D'après Toulmin – et je crois qu'il a raison – l'idée de certitude apparaît au moment des guerres de religion. Descartes vit à un moment tragique de l'histoire européenne, au moment des guerres de religion, à un moment où les protestants ont leur vérité, les catholiques ont la leur, les uns ont une certitude, les autres ont une autre certitude, des certitudes conflictuelles. Aussi le propos de Descartes est-il de concevoir une certitude qui soit accessible à tout le monde, une certitude que tout le monde pourrait partager et qui serait un élément de paix, de concorde possible entre les hommes. C'était donc tenter de sortir d'une situation tragique que d'introduire cette idée de certitude à la fois dans les sciences

(en exigeant qu'elles doivent s'inspirer des mathématiques, de l'arithmétique et de la géométrie) et, en philosophie, (avec l'idée du cogito) une certitude que tout le monde peut reconnaître.

L'idée de certitude apparaît ainsi comme un moyen de dépasser le tragique de l'histoire, d'aller vers un univers où il n'y a plus ce doute, un univers où il n'y a pas de guerres de religion, un univers où on peut dépasser les vicissitudes de l'histoire. Et curieusement, on retrouve exactement le même contexte chez Einstein. Chez Einstein aussi, il y a un besoin de dépasser le tragique de l'histoire, d'aller vers l'harmonie de l'éternel. On le sait, Einstein a toujours dit qu'il a appris plus de Dostoïevski qu'il n'a appris chez les physiciens; et il a toujours dit que ceux qui doivent faire de la physique théorique, ce sont ceux qui aiment vivre dans les montagnes, qui aiment l'air pur des montagnes, qui veulent fuir l'air pollué des villes. Ainsi, l'activité scientifique ne doit pas être une activité sociale, mais une activité qui va au-delà de la société, à la recherche d'une harmonie, une harmonie éternelle, une harmonie qui n'est pas entachée, comme le disait Lévi-Strauss, de la malédiction de l'histoire.

Un exemple de son attitude, c'est le fameux échange de lettres avec son ami M. Besso qui, lui, au contraire, lui pose toujours la question: «Mais l'irréversibilité et la succession dans le temps, qu'est-ce que tu en fais?» Et avec une patience qu'il n'a manifestée qu'à l'égard de son meilleur ami, Einstein répondait toujours: «Mais quelle irréversibilité? La flèche du temps n'existe pas dans la nature! C'est une conception purement humaine, purement relative.» Et quand Besso meurt, Einstein écrit à sa sœur: «Michele nous a quittés, mais pour nous physiciens convaincus, cela a peu d'importance car, nous physiciens, nous savons que le temps est "illusion".»

Et peut-être qu'après tout, la conception que Hawking développe avec ses collègues est inspirée par la même aspiration à échapper au tragique. Pour lui aussi peut-être qu'après tout, la souffrance, l'infirmité qui l'ont assailli peuvent de cette manière être dépassées et réduites à une simple illusion devant l'harmonie éternelle des choses.

Mais pouvons-nous nous arrêter là? Parce qu'il faut bien dire, il y a un prix à payer pour arriver à cette notion. Et le prix, déjà Descartes l'avait compris, c'est un dualisme fondamental; car enfin si l'univers peut être décrit de manière sta-

tique et « certaine » – conformément à une certitude atemporelle –, nous, nous ne pouvons pas nous décrire de cette manière. Pour nous, le temps est la dimension existentielle fondamentale; nous ne pouvons pas non plus décrire la vie sans parler d'évolution dans une perspective de certitude. Donc, le prix à payer, c'est le dualisme et finalement l'aliénation. Le prix à payer, c'est de détacher l'homme du devenir. C'est de présenter, d'un côté, comme le faisait Descartes, l'univers matériel comme un automate qui ne devient pas, qui est effectivement soumis à des lois certaines et déterministes et, de l'autre côté, l'intelligence, la vie humaine qui est « pensée ». Ce dualisme est un élément essentiel dans la conception cartésienne.

Pouvons-nous aujourd'hui encore voir la science comme quelque chose de désincarné, d'étranger aux besoins de l'homme? Aujourd'hui, je ne crois pas que nous puissions dire que l'idéal du scientifique est de vivre dans les hautes montagnes où il n'y a pas de pollution. Ne serait-ce pas plutôt de s'intéresser aux causes de la pollution et d'essayer de créer des villes dans lesquelles il y aurait peut-être un peu moins de pollution, de s'intéresser aux problèmes humains? La science, après tout, n'est pas seulement une entreprise individuelle, un espoir de libération de l'homme, un peu dans le sens du bouddhisme, mais aussi une entreprise culturelle, une entreprise sociale dans laquelle on ne peut pas concevoir la science comme une activité coupée de la vie, de la société.

Ainsi, je voudrais souligner que le titre de Hawking, « Une brève histoire du temps », me paraît paradoxal, parce qu'au fond ce n'est pas d'une brève histoire du temps qu'il s'agit, mais plutôt de la négation du temps. Hawking parle avant tout de cosmologie. Il essaie de montrer qu'il n'y a pas de « flèche du temps ». Si vous voulez donner au *temps* la signification que le temps devrait avoir selon Hawking, il faut introduire un temps *imaginaire*.

Qu'est-ce que c'est le temps imaginaire? Le temps imaginaire se conçoit dans le contexte de la relativité. Dans l'esprit de Newton, l'espace, le temps et la matière étaient des concepts distincts. La métrique de l'espace était euclidienne, le théorème de Pythagore que vous apprenez à l'école moyenne en est l'expression.

Dans la théorie de la relativité restreinte d'Einstein, l'espace et le temps sont reliés. Toutefois, la matière reste indépendante. L'intervalle fondamental n'est plus

un intervalle d'espace comme dans la géométrie euclidienne mais un intervalle d'espace-temps. Toutefois, le temps joue un rôle différent dans l'intervalle, il n'a pas le même signe. Comme on l'écrit d'habitude dans l'intervalle (ds^2), le temps est affecté d'un signe « + » et l'espace d'un signe « - ».

Qu'est-ce que nous propose Hawking ? Il nous propose, et c'est un des éléments les plus mystérieux du livre, de remplacer le temps par un *temps imaginaire*. Or, si vous vous rappelez un temps « t » par « it », « i » était l'imaginaire, la racine carré de -1, alors le carré change de signe. Si le carré change de signe, alors le signe du temps dans l'intervalle d'espace-temps devient le même que le signe de l'espace, c'est-à-dire qu'il n'y a plus de différence entre le temps et l'espace. Donc, il introduit le *temps imaginaire* pour spatialiser le temps. Au moment où on parle de *temps imaginaire*, on a spatialisé le temps. Donc, quand il nous parle de l'évolution dans le *temps imaginaire*, il ne fait plus de différence entre le temps et l'espace et, quand il nous dit « il faut un univers sans *boundaries* », c'est un univers sans *boundaries* dans un temps imaginaire, et évidemment il n'y a pas d'évolution dans ce temps.

La relativité générale d'Einstein, sur laquelle je reviendrai par la suite, présente une synthèse beaucoup plus grandiose encore. L'espace est désormais lié à la fois au temps et à la matière ; et ce lien se fait grâce au fait que, cette fois-ci, il y a une courbure de l'espace-temps et cette courbure dépend du contenu de la matière. Mais la relativité générale reste une théorie newtonienne dans ce sens qu'elle exprime de nouveau des certitudes et, de nouveau, il n'y a pas de *flèche du temps*.

Donc, le *temps cosmologique* est exorcisé par Hawking qui introduit le *temps imaginaire*. Alors quelles sont les autres *flèches du temps* ? Il parle de la flèche thermodynamique : vous vous rappelez – je ne vais pas faire l'expérience –, vous prenez un verre, ou une tasse, que vous jetez par terre et vous voyez que la tasse ou le verre se casse en petits morceaux. Voilà, c'est la flèche du temps ; et la flèche du temps thermodynamique signifie simplement que vous allez d'un état ordonné, le verre entier, vers un état désordonné dans lequel le verre est cassé en mille morceaux. Voilà, c'est banal !

C'est banal, mais c'est aussi peu convaincant parce que s'il y a des tasses qu'on peut jeter par terre et casser, c'est que quelqu'un a dû les fabriquer. S'il y a des tasses qu'on casse, il y a des tasses qu'on produit. Et les tasses qu'on produit sont

produites dans le même univers que les tasses qu'on casse. En d'autres termes, il est faux de penser que la *flèche thermodynamique* correspond à une évolution vers le désordre. Je reviendrai encore là-dessus. L'univers, tel que nous le voyons, contient des objets désordonnés – l'atmosphère dans cette chambre est formée d'un gaz dont les molécules vont dans tous les sens – mais il est plein d'objets très cohérents, très structurés. Une étoile, un être vivant sont très structurés.

Donc, l'univers contient à la fois l'ordre et le désordre, et l'évolution thermodynamique, ce n'est pas seulement l'évolution vers le désordre ; c'est une évolution qui comprend à la fois le passage vers l'ordre et le passage vers le désordre.

Hawking se demande : « Y a-t-il un lien, peut-être, entre l'expansion de l'univers et la flèche thermodynamique ? » Et sa réponse est : « Oui, il y a un lien parce qu'il faut que l'homme puisse vivre, qu'il puisse évoluer, et c'est pour ça qu'il doit vivre dans la période d'expansion de l'univers. » Mais, de nouveau, me semble-t-il, c'est assez peu convaincant, parce que, en fait, pourquoi donner une position spéciale à l'homme ? Il faut se demander alors : « Pourquoi l'homme ? » Et d'ailleurs, l'homme a besoin d'une *flèche du temps*, mais un animal a aussi besoin d'une *flèche du temps*. Et la croûte terrestre pour se constituer et un minéral pour se développer ont aussi besoin d'une *flèche du temps*. Donc, la *flèche du temps* ne peut pas être expliquée par le principe « anthropique » dont on parle beaucoup dans le livre – moins dans le film –, parce que le principe anthropique signifie que l'univers est évidemment tel que l'homme puisse y trouver une place. Mais expliquer l'univers parce que l'homme y a une place, c'est quelque chose qui me paraît très artificiel.

Le fait que la physique classique insistait sur le déterminisme et la certitude, je ne suis pas le premier, bien entendu, à l'avoir remarqué. C'était le point de départ de la philosophie d'Henri Bergson et aussi le point de départ de Heidegger, et de bien d'autres. Pour ces philosophes, le point de départ était de constater : « Vous voyez, la physique ne peut pas atteindre l'essence des choses, qui est la temporalité ; la physique reste à la surface des choses, elle ne parle que des choses qui se répètent. » C'est ce qu'a dit Bergson, et puis il ajoute : « Le temps est invention, ou rien du tout. Le temps est associé à la création de nouveautés. » Mais la physique ne peut pas parler de création de nouveautés.

Curieusement, le philosophe Bergson et le physicien Einstein se rejoignent sur ce point-là. Et, au fond, l'attitude que j'ai essayé d'adopter au cours de ma vie

scientifique était une attitude différente. Je me suis dit que payer comme prix, pour introduire le temps, l'abandon de la science classique comme le voulaient Bergson ou Whitehead, c'était un prix trop grand, parce qu'enfin la science nous a permis d'établir un dialogue entre l'homme et la nature.

Donc, comment incorporer finalement la *flèche du temps*? Je me suis dit que c'est parce que nous avons étudié jusqu'à maintenant des situations trop simples; c'est comme si nous avons étudié des briques. La brique iranienne et la brique gothique se ressemblent, mais si vous regardez le bâtiment tout entier, le palais iranien et la cathédrale gothique ont très peu de rapport. Donc, c'est parce que nous n'avons pas, dans l'histoire des sciences, étudié des situations suffisamment complexes que nous n'avons pas rencontré la *flèche du temps*. Pour un physicien, il n'y a pas de doute, il y a des phénomènes où le temps comme irréversibilité n'intervient pas. Dans un pendule sans friction, le temps n'intervient pas. Dans le mouvement de la Terre autour du Soleil, la direction du temps ne joue aucun rôle; tout dépend des conditions initiales. Donc, on peut imaginer un univers sans direction du temps. On pouvait imaginer que le pendule est un symbole de l'univers.

Pour quelqu'un qui vient des sciences du complexe, comme un chimiste, c'est beaucoup plus difficile parce que n'importe quelle réaction chimique, comme n'importe quel processus évolutif biologique, implique une direction du temps. Donc, imaginer un univers sans temps est quelque chose de presque inconcevable du point de vue des phénomènes qui nous entourent, bien entendu les physiciens le savent.

Alors, comment répondent-ils? Ils répondent par le principe anthropique ou bien ils répondent en disant: « Ah oui! Mais la chimie, ce sont des phénomènes beaucoup plus compliqués; la biologie, ce sont des phénomènes encore beaucoup plus compliqués, donc vous ne savez pas leur appliquer les lois fondamentales. Vous devez faire en plus des approximations, et ce sont ces approximations qui vous conduisent à une *flèche du temps*. » Mais cela, je n'ai jamais pu y croire parce que, si c'était comme cela, nous serions par nos approximations les pères du temps et l'existence même de la vie serait due à nos erreurs. Or, je crois que ça, c'est très difficile à imaginer, que nous soyons responsables de la vie, alors que nous sommes le résultat de l'évolution biologique.

Donc, « l'histoire du temps », tel qu'il me semble, s'est faite au cours de ce siècle, et elle est très différente de l'histoire du temps telle que vous la voyez décrite dans ce film. Il me semble que l'histoire du temps au cours de ce siècle comprend d'abord la résurgence du problème du temps et aussi les premiers essais pour répondre à l'interrogation du temps. Pourquoi résurgence ? D'abord, dès le XIX^e siècle, le problème du temps s'est posé. Nous ne sommes conscients du paradoxe du temps que depuis les travaux de Boltzmann. Boltzmann était fort influencé par Darwin et Boltzmann était le premier physicien à penser à une conception évolutive de l'univers comme généralisation de la conception darwinienne. Mais on a reproché à Boltzmann que ce qu'il disait était en contradiction avec les lois réversibles de Newton. Et Boltzmann, alors qu'au point de départ était convaincu qu'il avait raison, qu'il y avait une *flèche du temps* dans l'univers, a accepté l'objection, et a décidé de rester fidèle à la conception newtonienne. Il était très malheureux ; quand vous lisez ses travaux, vous voyez qu'il devient de plus en plus hésitant. Je compare toujours Boltzmann à un homme qui aime deux femmes à la fois et qui n'arrive pas à se décider. Et au fond il était persuadé en même temps de la conception évolutive de l'univers et de la validité des lois de Newton. Comment concilier l'un et l'autre ? Au fond, c'était une contradiction qu'il n'a jamais pu résoudre et qui probablement a joué un rôle dans le suicide de Boltzmann.

Donc, c'est depuis ce moment-là, il y a 100 ans, que nous savons qu'il y a là un paradoxe, qu'il y a là un problème. Kant ne le savait pas ; Laplace ne le savait pas. Et quand Boltzmann a reculé et qu'il a dit : « Bien, il n'y a pas de direction intrinsèque du temps, c'est vrai, ce n'est que la direction vers le probable, le désordre, c'est la tasse qui se casse », cela n'a pas déclenché de crise. Au contraire, Einstein a dit : « C'est un triomphe ! » Dans son esprit, en éliminant le temps, nous nous rapprochons de la physique de Dieu, ou pour rappeler le film, nous nous rapprochons de la certitude. Et je crois que le XX^e siècle jouera un rôle important dans l'histoire de la philosophie des sciences parce que, pour des raisons très inattendues, je crois qu'on doit maintenant croire à une *flèche du temps*, à un univers évolutif, à un univers dans lequel il n'y a pas seulement des lois, mais un univers dans lequel il y a aussi des événements, tout comme dans l'histoire. Il y a des lois et des événements. Et les raisons pour lesquelles se produit ce changement radical d'attitudes sont inattendues. La première, c'est la découverte du *rôle constructif du temps* depuis une trentaine d'années.

On a, en effet, découvert que quand vous allez loin de l'équilibre, par exemple en considérant une réaction chimique, que vous empêchez d'arriver à l'équilibre, se produisent des phénomènes extraordinaires que personne n'aurait cru possibles; par exemple, des horloges chimiques. Une horloge chimique, qu'est-ce que c'est? Prenons un exemple: vous avez des molécules, qui de rouges peuvent devenir bleues. Comment imaginez-vous voir ce phénomène? Si vous pensez que les molécules vont au hasard, vous allez avoir des flashes de bleu, puis des flashes de rouge. Mais il se produit, loin de l'équilibre, dans d'importantes classes de réactions chimiques, des phénomènes *rythmiques*. Tout devient bleu, puis tout devient rouge, puis tout devient bleu, c'est dire qu'une *cohérence* naît, qui n'existe que loin de l'équilibre. Si vous vous rapprochez de l'équilibre, vous voyez le phénomène rythmique.

Donc, loin de l'équilibre se produisent des phénomènes ordonnés qui n'existent pas près de l'équilibre. Si vous chauffez un liquide par en dessous, il se produit les tourbillons dans lesquels des milliards de milliards de molécules se suivent l'une l'autre. De même, un être vivant, vous le savez bien, est un ensemble de rythmes, tels le rythme cardiaque, le rythme hormonal, le rythme des ondes cérébrales, de division cellulaire, etc. Tous ces rythmes ne sont possibles que parce que l'être vivant est loin de l'équilibre. Le non-équilibre, ce n'est pas du tout les tasses qui se cassent; le non-équilibre, c'est la voie la plus extraordinaire que la nature ait inventée pour coordonner les phénomènes, pour rendre des phénomènes complexes possibles.

Donc, loin d'être simplement un effet du hasard, les phénomènes de non-équilibre sont notre accès vers la complexité. Et des concepts comme l'auto-organisation loin de l'équilibre, ou de structure dissipative, sont aujourd'hui des lieux communs qui sont appliqués dans des domaines nombreux, non seulement de la physique, mais de la sociologie, de l'économie, et jusqu'à l'anthropologie et la linguistique.

Pour comprendre ce que cela signifie, il suffit, et je donne toujours cet exemple, de penser à une ville, une ville par opposition à un cristal. Un cristal, c'est une structure ordonnée d'équilibre. Le cristal une fois formé, il faut le laisser tranquille sinon il peut fondre, il peut casser, mais la ville, il ne faut pas la laisser tranquille. Il faut qu'elle réagisse avec ce qui l'entoure. Et c'est cette réaction avec ce qui l'entoure qui va lui donner sa permanence. La ville est différente suivant

que c'est une forteresse, un centre religieux, un centre commercial sui-ivant des interactions avec le monde extérieur. Et ce sont ces interactions avec le monde extérieur qui lui donnent sa stabilité et sa signification. Et au fond, je me dis que ce que j'ai trouvé il y a une trentaine d'années, ces *structures dissipatives*, c'est une idée banale dans le domaine social et dans le domaine économique; mais, curieusement, on n'avait pas remarqué que la même chose existe au niveau de la physique et de la chimie. Que là aussi, le *loin de l'équilibre* donne de la complexité. Et s'il n'y avait pas le *loin de l'équilibre*, il n'y aurait pas de vie, il n'y aurait pas de cohérence. Le *loin de l'équilibre*, l'équation de la chimie, comme ceux de la sociologie, sont non linéaires. Près de l'équilibre on peut linéariser; il y a alors une seule solution; loin de l'équilibre, avec les mêmes conditions limites, vous avez beaucoup de solutions et c'est cela qui conduit à l'idée d'auto-organisation. L'idée d'auto-organisation, c'est que le système, par suite de son histoire, se meut suivant des chemins différents traversant des états différents. Et quand vous êtes dans un « état », c'est parce qu'il y a eu des événements précédents qui vous y ont amenés. Si le Québec est dans telle et telle situation sociale et économique, c'est parce qu'il y a toute une série d'états, d'événements précédents qui l'ont conduit à cet état et, au fond, les différentes civilisations du monde, c'est presque comme des bifurcations à partir des mêmes états de départ.

Donc, ce rôle constructif du temps aujourd'hui ne peut pas être mis en doute. Les phénomènes irréversibles, loin d'être simplement des apparences ou des choses triviales, comme le chemin vers le désordre, ont au contraire un rôle constructif extraordinaire. Mais alors, évidemment, l'idée que l'irréversibilité, en contradiction avec les lois de la dynamique, serait due à nos erreurs, à notre mauvaise interprétation de ces lois, devient intenable. Aussi longtemps que la *flèche du temps* était considérée comme un phénomène secondaire, banal, c'était possible de l'imaginer; mais maintenant que nous voyons que c'est crucial, essentiel pour comprendre la position de la vie, la position de l'homme, alors, évidemment, il devient impossible de dire que la *flèche du temps* est le résultat de nos erreurs. Cette situation était déjà claire il y a 20 ou 30 ans. Malheureusement, la science est un domaine très vaste et les chercheurs qui s'occupent de cosmologie ne connaissent pas souvent la physique des phénomènes de non-équilibre; et sans doute d'habitude, ceux qui s'occupent de physique de non-équilibre connaissent peu la cosmologie. Il y a là un manque de communication à l'intérieur du monde des scientifiques.

Mais les problèmes qui m'ont préoccupé au cours des 10 ou 15 dernières années sont alors nécessairement les problèmes liant le fondement de la physique à l'existence de cette *flèche du temps* constructive, qui est à la base de cette « évolution créatrice » dont parlait Bergson⁶. Et là, quelle est la solution possible ? Il n'y a pas de doute qu'il y a des cas où il n'y a pas de *flèche du temps*, où Newton a raison. Est-ce que tous les systèmes de la dynamique sont des systèmes dans lesquels la *flèche du temps* n'apparaît pas ? Une des grandes surprises de ce siècle fut la découverte de systèmes dynamiques dans lesquels apparaît une *flèche du temps*. Ces systèmes dynamiques sont les systèmes instables, systèmes chaotiques ou systèmes, je m'excuse du jargon, non intégrables de Poincaré. Et je veux citer une phrase, qui m'avait fort impressionné, d'un des grands mécaniciens de notre temps, le théoricien Sir James Lighthill, qui écrivait, il y a quelques années : « Ici, il me faut m'arrêter et parler au nom de la grande fraternité de praticiens de la mécanique. Nous sommes très conscients aujourd'hui de ce que l'enthousiasme que nous laissaient nos prédécesseurs pour la réussite merveilleuse de la mécanique newtonienne les amenait à des généralisations dans le domaine de la prédictibilité, que nous savons désormais fausses. Nous voulons collectivement présenter nos excuses pour avoir induit en erreur le public cultivé en répandant, à propos du déterminisme par des systèmes qui satisfont aux lois newtoniennes du mouvement, des idées, mais qui se sont, après 1960, révélées incorrectes. »⁷

Donc, à côté de la révolution quantique et de la révolution de la relativité, il y a une troisième révolution peut-être aussi importante, et c'est la révolution liée à la branche la plus ancienne de la physique, la dynamique, qui, maintenant, s'écarte de l'idéal de certitude et d'intemporalité.

Je crois qu'il y a quelque chose d'absolument unique dans cette déclaration parce que, souvent, un physicien, un mathématicien doit s'excuser d'avoir fait des affirmations qu'après il doit renier. Mais entendre un des grands physiciens-mathématiciens de notre temps, s'excuser d'avoir induit en erreur le public pen-

6 *L'évolution créatrice*, écrit par Bergson en 1907, est un livre qui défend le concept d'élan vital et s'oppose à l'idée que le moteur de l'évolution est défini par sa finalité, sa cause finale. L'élan vital conçoit une nature qui invente et est donc indéterminée et imprévisible. H. Bergson, *L'évolution créatrice*, Paris, PUF, 2013.

7 James Lighthill, « The recently recognized failure of predictability in Newtonian dynamics », in *Proceedings of the Royal Society*, Londres, A 407, 1986, p. 35-50.

dant trois siècles, et cela non pas sur un détail, sur quelque point particulier qui finalement n'intéresse que le spécialiste, mais sur une chose essentielle, le déterminisme, c'est cela qui rend cette déclaration extraordinaire !

Il se crée donc là un fossé. Nous sommes loin de l'idéal de certitude, d'omniscience, dont vous a entretenu le livre et le film sur Hawking. Au contraire, nous arrivons à l'affirmation que le déterminisme est de portée limitée dans les systèmes dynamiques complexes.

Que sont les systèmes complexes ? Il y en a essentiellement de deux types. Les systèmes complexes les plus simples, ce sont les systèmes « chaotiques ». Je vais vous donner un exemple simple de système chaotique : ce n'est pas un exemple physique, mais je prends l'exemple le plus simple qui soit, « l'application de Bernoulli ». Vous prenez un nombre entre 0 et 1 et vous le multipliez par deux, toutes les secondes. Et vous enlevez toujours la partie qui dépasse l'unité. Donc vous prenez, mettons 0,13, puis 0,26, 0,52, 0,04, etc. C'est une loi extrêmement simple, linéaire. Eh bien ! si vous suivez les trajectoires, vous voyez qu'au bout d'un petit temps la moindre erreur conduit à des trajectoires tout à fait différentes. Le problème de la prédiction n'est pas soluble au plan des trajectoires. Donc, voilà un problème dont vous connaissez l'équation de mouvement, ici un peu simplifiée, et qui pourtant n'est pas soluble. Donc, la notion de trajectoire, qui est la notion fondamentale de la physique newtonienne, échoue ici.

Par contre, si vous considérez, non pas une seule trajectoire dans cet exemple, mais une distribution de trajectoires, une probabilité, et que vous itérez, la probabilité devient de plus en plus simple, de plus en plus régulière, et au bout de quelques itérations, vous tendez vers le résultat final qui est une distribution uniforme. Donc, alors que le problème n'est pas soluble au plan des trajectoires, il est soluble au plan des fonctions de probabilité ; il n'est soluble qu'au moment où vous considérez les ensembles des trajectoires et la notion d'irréversibilité n'apparaît pas au niveau d'une trajectoire mais apparaît au niveau de l'ensemble des trajectoires. C'est un peu comme l'histoire des sociétés ; l'histoire des sociétés n'apparaît pas au plan d'un individu unique. Considérons la société égyptienne, ou la société grecque : je pense qu'il n'y a personne de plus intelligent aujourd'hui que Platon ou Aristote, mais c'est la société dans son ensemble qui évolue, ce sont les relations entre les hommes qui changent. Et quand je dis que je vieillis, ce ne sont pas les molécules qui vieillissent ; ce sont les relations entre

ces molécules qui changent. Donc je ne dois pas essayer de réduire le monde à une trajectoire ou, en mécanique quantique, à une fonction d'onde, mais je dois considérer l'ensemble des trajectoires, la probabilité des trajectoires pour comprendre le problème de l'évolution.

Et c'est la même chose – je ne suis pas entré dans trop de détails – pour les systèmes *non intégrables*. Qu'est-ce que ça signifie un système *non intégrable*? C'est un système – et c'est Poincaré il y a une centaine d'années qui a introduit le premier cette division – que vous ne pouvez par aucune transformation rendre semblable à un système de particules indépendantes. Il reste toujours des interactions entre les particules. Si tous les systèmes étaient intégrables, il n'y aurait pas de cohérence, il n'y aurait pas de vie, il n'y aurait pas de chimie. De manière plus précise, Poincaré a montré que la non-intégrabilité était due à des phénomènes de résonance qui conduisent alors à des divergences. Le détail n'a pas d'importance, mais ce qui est intéressant, c'est que les résultats de Poincaré ont montré que les équations de Newton n'étaient pas suffisantes pour résoudre un problème dynamique. Que même si vous avez les équations, les solutions restent ambiguës.

C'est dans de tels systèmes que s'introduisent les notions de probabilité et d'irréversibilité. Par exemple, si je considère le verre d'eau qui est devant moi, je puis me poser la question : dans quel sens le verre d'eau vieillit-il ? Les molécules d'eau ne vieillissent sûrement pas à l'échelle du temps qui m'intéresse. Mais les molécules se rencontrent, créent des corrélations, les corrélations doubles deviennent des corrélations triples et ainsi de suite. Cela continue indéfiniment. Il y a un flux de corrélations. Il y a donc des phénomènes ordonnés dans le temps qui se passent dans ce système. Par des simulations numériques, vous pouvez voir comment apparaissent les corrélations binaires, les corrélations ternaires, des corrélations impliquant de plus en plus de particules. C'est un peu comme deux personnes qui se rencontrent et qui se parlent. Une fois qu'elles ont parlé, il reste quelque chose, même quand elles s'en vont, le message se répand. Chacun de nous est au centre d'un réseau de « corrélations ».

Une fois que vous dépassez les systèmes simples, les systèmes répétitifs, comme le pendule ou le mouvement périodique de la Terre autour du Soleil, vous arrivez à des situations dans lesquelles il n'y a plus de certitude et des situations dans lesquelles il y a une *flèche du temps*. Alors, la perspective devient

tout à fait différente. Et l'idée qu'on peut se faire de la cosmologie est aussi tout à fait différente. La tentative de Hawking était, comme je le disais, de spatialiser le temps. Mais on peut voir les choses d'une manière tout à fait différente. On peut plutôt essayer de temporaliser l'espace, de voir quels sont les phénomènes irréversibles qui peuvent donner naissance à l'espace-temps. C'est la direction dans laquelle nous avons travaillé. L'idée, finalement, c'est qu'il faut regarder ce qui se passe aujourd'hui, étudier les phénomènes irréversibles qui se passent aujourd'hui pour comprendre, par exemple, comment le phénomène irréversible fondamental au début de l'univers a peut-être pu se passer.

Évidemment, il y a des circonstances particulières. C'est peut-être le phénomène le plus irréversible qui soit parce qu'enfin comment pouvons-nous imaginer le début de l'univers ? Un aspect essentiel est le passage de particules *virtuelles* à des particules *réelles*.

Dans le film, vous avez vu ce que sont les particules «virtuelles». Les particules virtuelles sont des particules qui se créent par paires, qui vivent un certain temps et puis se recombinent par suite du principe d'incertitude d'Heisenberg. Les particules «réelles», au contraire, ne doivent plus se recombinaison, elles ne sont plus tenues par un fil l'une à l'autre.

Donc, la création de l'univers, la création de la matière telle que nous la connaissons, correspond avant tout à une création de «possibilités», créant à la fois des phénomènes désordonnés et en même temps à des phénomènes hautement organisés. Les phénomènes irréversibles ont toujours ces deux aspects, la tendance vers le désordre et la tendance vers l'ordre. Et nous trouvons ces deux aspects dans l'univers. Nous trouvons à la fois le fameux rayonnement résiduel qui contient du désordonné et en même temps les particules élémentaires, tel le proton, qui sont comme des forteresses qui ont été construites pour durer. François Jacob s'est demandé quel est le rêve d'une cellule biologique : c'est de se multiplier. Quel est le rêve d'une particule élémentaire ? C'est probablement de durer. Mais pour durer, il faut des structures extraordinairement complexes dont la complexité est comparable à la complexité des molécules biologiques. Ce double aspect de désordre et d'ordre apparaît dès le début de l'univers.

Donc le prix de l'univers, c'est un prix entropique. Je vous ai parlé tantôt de phénomènes qui se produisent loin de l'équilibre. À un certain moment, des

tourbillons ou des horloges chimiques se produisent. Évidemment, l'énergie est conservée. Il n'y a pas de violation de la conservation de l'énergie, mais il y a un prix entropique, l'entropie augmente. Ainsi, matière et entropie sont des concepts étroitement liés.

Dans cette conception, le futur de l'univers est quelque chose de très incertain. L'univers commence par une instabilité. Dans le film comme dans le livre, on nous donne que le choix entre différentes morts : la mort par expansion thermique suite de l'expansion spatiale, donc l'univers va atteindre la mort thermique. L'autre forme de mort, c'est la contraction et une température à densité énorme qui vont tuer toute organisation.

Ces prédictions sont tout aussi incertaines que les prédictions que je pourrais vous faire en parlant du monde humain tel qu'il sera dans mille ans. Si je veux vous parler du monde humain dans mille ans, je devrai connaître tous les événements qui pourront se produire, toutes les inventions qui pourront se faire. Mais la nature aussi invente, la nature crée aussi des événements. La nature présente des instabilités. Le monde n'est pas comme une pomme tombée d'un arbre et qui ne peut que pourrir. Le monde reste attaché à l'arbre qui l'a produit et nous ne savons pas quel sera le futur de l'univers. Les prédictions de mort qui se trouvent presque dans tous les livres de cosmologie sont à mon avis des prédictions qui sont le résultat des croyances à la certitude et au déterminisme.

Je pense qu'il est temps de conclure en disant que l'existence de la *flèche du temps*, que nous rencontrons aujourd'hui à tous les plans de la physique et de la chimie, indique que les lois de la physique ne peuvent pas correspondre à la certitude ni à la symétrie entre futur et passé. Au lieu d'exprimer ce qui est certain, ces nouvelles lois doivent exprimer ce qui est possible, doivent exprimer les évolutions possibles. Au début de l'univers, l'univers était comme un enfant, un enfant qui peut devenir un dentiste, un chauffeur de taxi, un joaillier, un avocat, mais pas tout à la fois.

Ainsi, l'univers « devient ». Comme l'homme, la nature devient. La position de la Lune, demain à sept heures, n'est pas un événement parce qu'elle est déjà déterminée par les lois de Newton aujourd'hui ; mais la rencontre de ce soir est un événement qui pouvait se produire et qui pouvait ne pas se produire. La nouvelle formulation des lois de la nature rend possibles des événements.

Et c'est ce mélange d'événements et de régularités qui est caractéristique de l'univers; et j'ai toujours pensé qu'un modèle de l'univers, c'est peut-être une fugue de Bach ou une sonate de Mozart. Dans une sonate de Mozart, vous avez des règles. Mais les règles ne suffisent pas. Il y a des événements inattendus. Il y a quelque chose qui dépasse les règles et c'est cela qui caractérise l'œuvre d'art.

J'ai essayé de vous expliquer la manière dont il me semble qu'on peut voir aujourd'hui l'univers. Nous ne sommes pas sur le point d'aboutir à ces théories liées qu'on pourrait résumer dans une seule équation. Pourtant c'est là une idée qui est très fréquente aujourd'hui: voyez le livre de St. Weinberg, *Dreams of a Final Theory*, ou le livre de L. Lederman, *God's Particle*. Je crois au contraire que nous sommes au début d'une nouvelle aventure de la raison, au début d'une science qui permet d'éviter l'aliénation issue du dualisme cartésien. Aliénation parce que tant que ce dualisme est là, nous sommes exclus de la description que nous faisons du monde. Cet aspect a été reconnu par de grands savants, par Jacques Monod, par exemple, qui parlait de la vie « en marge des lois » et de l'homme en « marge de la vie de l'homme tzigane aux confins de l'univers »; ou de Weinberg, qui dans son fameux livre *Les Trois Premières Minutes*⁸ dit: « Plus nous connaissons l'univers, plus il nous paraît "pointless" », sans intérêt, comme disait Whitehead, sans couleur, sans saveur. C'est vrai, il était sans saveur, sans couleur parce qu'on le décrivait sans couleur et sans saveur.

Je crois que ce qui caractérise cette nouvelle aventure de la raison, c'est cet élan qu'a exprimé Richard Tarnas, un philosophe américain, en écrivant: « The passion of the western world is to reunite with the ground of its being. » Il y a aujourd'hui, à la fin de ce siècle, comme un besoin de retrouver l'unité perdue. L'unité perdue et cela malgré tous les succès de la science et malgré toutes ses grandes contributions à notre civilisation. Aujourd'hui, un des objets, je pense, de la science est de retrouver cette unité.

La science d'aujourd'hui doit chercher cette voie étroite, trouver un chemin entre deux extrêmes, aliénants tous les deux. L'un, c'est un monde déterministe qui nous rend étranger au monde que nous décrivons et l'autre, c'est un monde aléatoire qui rendrait toute prévision impossible.

Et ce chemin entre les deux est en train de s'élaborer pour le moment. Dans cette

⁸ En français: Steven Weinberg, *Les trois premières minutes de l'univers*, traduit de l'anglais par Jean Benoît Yelnik, Paris, Seuil, 1988.

perspective, il y a beaucoup de futurs, le futur n'est pas donné, le futur est une des possibilités impliquées par le présent. Ainsi, comme l'avait si joliment écrit Valéry, « le futur devient construction », et c'est une construction à laquelle chacun de nous peut participer.

Cette conférence a été prononcée le 24 septembre 1993 au Musée de la civilisation dans le cadre de la soirée d'ouverture du 4^e Festival international du film scientifique du Québec.

Merci au Musée de la civilisation, Québec pour leur soutien et à Marine Prigogine pour la mise à disposition gracieuse du texte.