

Rencontres philosophiques de Langres

3, 4, 5 octobre 2019

Séminaire D : Le temps et son irréversibilité

« La mise en question de l'irréversibilité du temps dans la physique contemporaine »

Séminaire animé par Bernard Piettre, professeur honoraire de philosophie
en classes préparatoires aux grandes écoles

Nous avons vu que le temps newtonien, que la variable universelle « t » n'impliquait nulle irréversibilité des phénomènes physiques, même si nous faisons l'expérience de cette irréversibilité. Les équations se conformant à la loi de Newton et aux lois de la mécanique classique sont dites invariantes par rapport à la flèche du temps; leur solution dans les faits donne une orientation temporelle que la loi en elle-même n'indique pas.

Or les lois de la physique relativiste et de la physique quantique – les deux grands pans de la physique contemporaine – sont également invariantes par rapport à la direction du temps, elles n'impliquent pas que les phénomènes décrits suivent un cours irréversible. On peut inverser passé et futur des phénomènes décrits, sans qu'elles soient affectées par cette inversion.

Exemple en relativité : les lois de la mécanique classique - invariantes par rapport à une direction du temps – restent toujours valides, même si la théorie de la relativité permet de les interpréter de manière nouvelle en donnant un sens totalement différent aux notions d'espace et de temps. Entre autres choses, il n'y a plus de temps unique ou d'horloge universelle. Cela paraît même aggraver la cause du temps et de son irréversibilité effective dans la nature: de même qu'il n'y a plus haut ni bas dans l'absolu, comme l'a montré Galilée, de même il n'y a plus ni passé ni futur dans l'absolu, sinon que relativement à un système de coordonnées. Ce qui est passé pour moi peut être encore futur pour un autre, il y a autant de présents que de systèmes de coordonnées.

Exemple en physique quantique : les lois permettant de décrire ce qui se passe au niveau subatomique, rendent aussi bien compte de la capture d'un électron par un atome que la perte par cet atome d'un électron... De façon générale on ne peut déduire *a priori* des lois de la physique la direction temporelle des phénomènes qu'elles permettent de décrire.

Cependant, il est une loi de la physique, découverte au XIXe siècle, le second principe de la thermodynamique, qui indique une orientation temporelle du phénomène qu'elle permet de décrire : une irréversibilité nécessaire de la dissipation de l'énergie – même si celle-ci reste constante. Comment intégrer cette loi qui décrit une temporalité effective des phénomènes, à

l'intérieur d'un ensemble de lois intemporelles (où la variable t définit un ordre du temps et non une direction) ? Voici une question sensible qui va diviser les physiciens.

Par ailleurs la négation du temps a à voir avec la négation de la contingence dans l'univers. La notion de loi physique implique une constance dans le temps de rapports nécessaires, au point que l'avenir est en droit prévisible, même si du fait des limites de nos connaissances on ne peut parfaitement le prévoir. Si tel est le cas, tout état futur dans l'univers serait logiquement déductible de son état présent et de son état passé. Beaucoup de physiciens restent attachés tacitement à une vision leibnizienne de l'univers. Et si la contingence dans les processus physiques (et biologiques) s'invitait dans des rapports nécessaires, dans la dynamique même de la nature, au point de rendre l'avenir imprévisible, au moins en partie ? Ce serait donner raison à Bergson : « le temps est invention ou il n'est rien du tout » et admettre une dynamique de la nature effectivement inventive.

Les développements de la physique contemporaine, selon des aspects certes très différents, - on songe ici à la physique quantique, aux théories du chaos, et par ailleurs à la complexité des systèmes dynamiques soumis au second principe de la thermodynamique – redonnent peut-être ses lettres de noblesse à la notion de hasard rendant des phénomènes imprédictibles et contribuant à l'émergence d'une asymétrie universelle entre le futur et le passé.

1. D'une possible négation du temps (et de son irréversibilité) à partir de la théorie la relativité.

1.1. La relativité restreinte et la fin du temps universel (newtonien).

Einstein étend le principe de relativité galiléen des mesures des distances et des vitesses dans l'espace aux mesures de la durée. Non seulement la mesure des distances mais aussi celle des durées varient en fonction du système de coordonnées en mouvement uniforme pris comme référentiel par rapport à d'autres référentiels en mouvement uniforme ; seule est invariante la vitesse de la lumière, quelle que soit sa direction. Il n'est plus possible de se référer à un temps universel, absolu, commun à tous les observateurs, pas plus d'ailleurs qu'à un espace absolu immuable commun, que posait Newton.

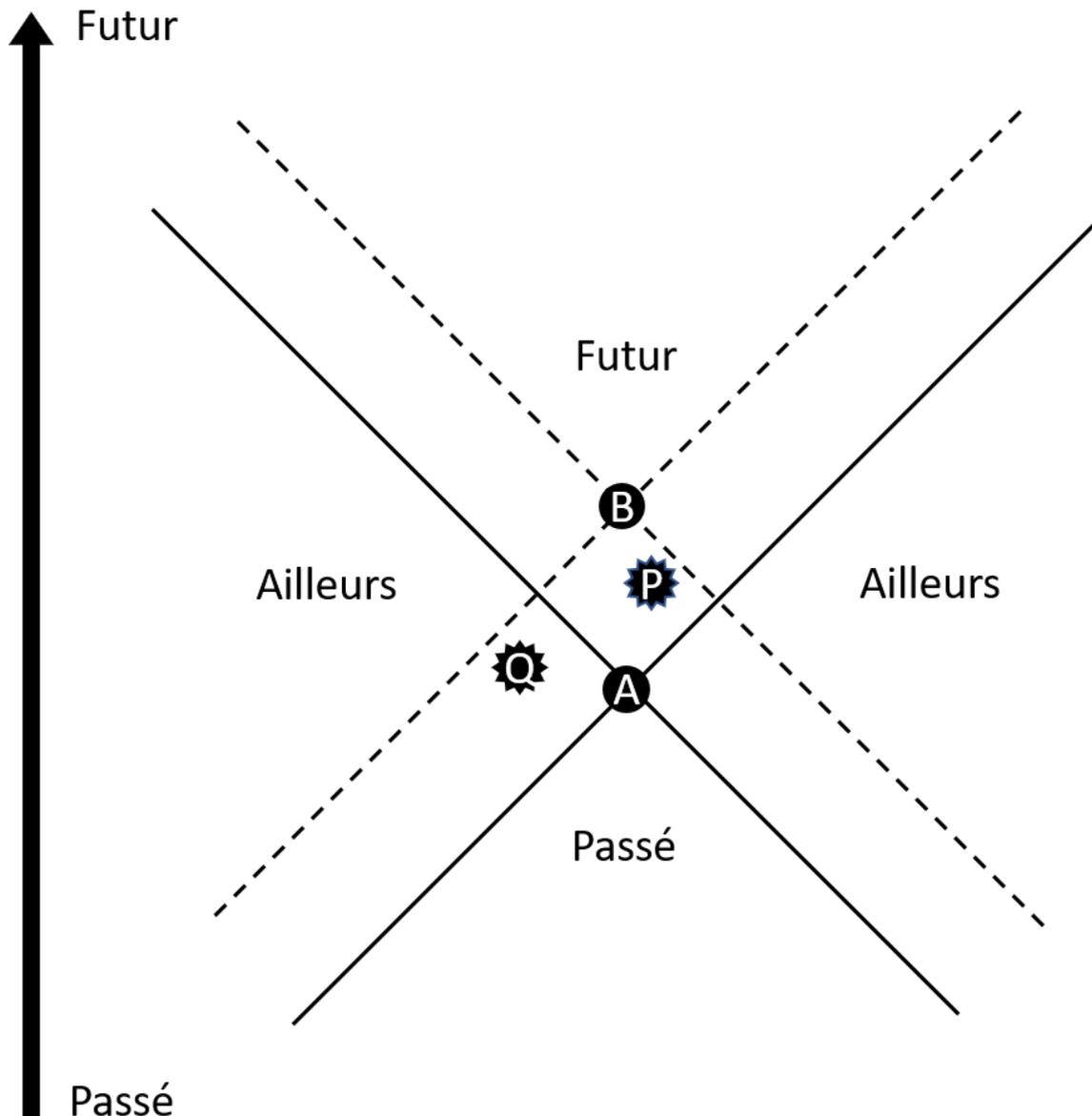
En laissant la question de l'espace dont la description géométrique - dans le cadre de la géométrie de Riemann – sera corrélée à celle de l'intensité du champ gravitationnel dans la Relativité générale, tenons-nous en à la question de la relativité des mesures du temps, dans la Relativité restreinte.

Selon le principe de relativité galiléen essentiel de la mécanique classique : chaque observateur en mouvement uniforme est lié à un système de coordonnées, autrement dit à un référentiel en fonction duquel il mesure la position et la vitesse relatives d'autres systèmes de coordonnées en mouvement uniforme. La relativité restreinte prend simplement en compte une contrainte nouvelle : un corps ne peut aller à une vitesse supérieure à celle de la lumière. Plus la vitesse d'un des observateurs est grande (et se rapproche de la vitesse de la lumière), plus son horloge sera lente relativement à celle d'un observateur extérieur se déplaçant à une vitesse inférieure. La mesure du temps varie d'un système de coordonnées à l'autre en fonction de leur vitesse respective et relative l'une à l'autre ; ce qui pour les uns dure une seconde peut durer pour les autres une minute. Il n'y a plus d'horloge commune, ou plus exactement, il n'y a plus de présent commun.

Ainsi les mêmes événements qui seront observés simultanément par les uns ne le seront pas par d'autres ; ils arriveront avant pour certains et après pour d'autres. Einstein donne cet exemple simple : prenons un train à très grande vitesse (proche de celle de la lumière) vu d'une part de l'intérieur par un passager se situant au milieu de la rame, et vu d'autre part de l'extérieur par un

observateur surplombant les rails. Si un faisceau lumineux part d'une extrémité avant A du train vers l'extrémité arrière B, et si un autre faisceau lumineux part de B vers A, le passager situé à égale distance des deux extrémités verra les deux faisceaux arriver à lui simultanément. L'observateur extérieur verra en revanche le rayon lumineux partant de l'avant du train (de A) arriver jusqu'au passager situé au milieu plus lentement que le rayon partant de l'arrière du train (de B) et allant dans le sens du train. L'idée d'une simultanéité absolue doit être abandonnée, et donc celle d'un présent commun à tous les observateurs.

En simplifiant il faudrait que la vitesse de la lumière soit infinie pour que des événements soient observés « en même temps » par des observateurs proches de ces événements et par des observateurs qui en sont très éloignés dans l'espace, que la lumière d'une supernova, par exemple, soit aperçue en même temps par tous les observateurs possibles existant dans l'univers. Certes on savait au XIXe siècle que la lumière se propageait à une certaine vitesse dans le vide, mais on avait du mal à concilier les lois de l'électromagnétisme et celles de la mécanique newtonienne, avant qu'Einstein rendît les choses claires. Einstein part du fait que la vitesse de la lumière constitue une vitesse limite, et qu'elle est invariante dans toutes les directions, pour la poser comme une constante universelle ; en revanche les coordonnées de l'espace mais aussi celles du temps varient selon le référentiel choisi. Le schéma des cônes de lumière de Minkowski rend très clairs les paradoxes autour du temps qu'implique la théorie de la relativité restreinte.



Présent, passé et futur varient selon la position et la vitesse respective des observateurs. Différents observateurs de l'univers se situent au point de convergence de deux cônes de lumière symétriques ; l'un représente, par rapport à chaque observateur, tous les événements passés qui lui sont connus par la lumière qui en arrive, et l'autre tous les événements futurs, c'est-à-dire ceux dont la lumière ne lui est pas encore parvenue. La pente d'un cône de lumière symbolise la ligne-limite de la vitesse de la lumière ; ce qui est au-delà de cette ligne, ne se situe ni dans le passé ni dans le futur de l'observateur, mais dans « l'ailleurs », c'est-à-dire dans ce qui est strictement inobservable, ou de ce qui serait observable si on pouvait aller plus vite que la lumière. Or selon le schéma ci-dessus, le déplacement irréversible de la lumière allant du passé vers le futur n'est pas tel que ce qui soit passé pour l'un le soit pour un autre, ou que ce qui soit à venir pour l'un soit à venir pour l'autre, le présent étant symbolisé par le sommet de chaque cône (A et B). Ainsi un point P, par exemple, situé dans le cône de lumière futur de A peut être situé en revanche dans le cône du passé d'un autre observateur B : il est connu de B mais n'est pas encore connu de A ; et si un point Q se situe en dehors des cônes du passé et du futur de A, il est dans « l'ailleurs de A », tout en se situant dans le cône passé de B : il est alors connu de B mais ne peut être connu de A, etc.

1.2. De la théorie de la relativité à la négation du temps. La théorie de l'univers bloc.

Regardons ensemble quelles conclusions philosophiques à propos de celle relativité des notions de présent, passé, futur en tirent des physiciens – des physiciens contemporains.

Nous retrouvons Carlo Rovelli qui énonce très clairement les conséquences indéniables de la théorie de la relativité, fort troublantes pour le commun des mortels et pour le philosophe :

Un présent global objectif n'existe pas, tout au plus pouvons-nous parler d'un présent relatif à un observateur en mouvement (...)

Toute idée selon laquelle l'univers existe maintenant dans une certaine configuration et change en bloc avec l'écoulement du temps ne fonctionne plus. (...)

Mais alors ce qui est réel pour moi est différent de ce qui est réel pour vous, tandis que nous voudrions utiliser l'expression réel – pour autant que cela soit possible – de façon objective. Il n'est donc pas pertinent de penser le monde comme une succession de présents.¹

Un autre (astro)-physicien contemporain - Lachièze-Rey - dit autrement les mêmes choses :

Pas de notion de présent, donc, dans l'espace-temps de la relativité. Seule exception : l'instant unique de mon histoire qui correspond à moi ici en train de parler (ou d'écrire) : le point de ma ligne d'univers qui se réfère à l'événement que je désigne en parlant

... le temps n'existe pas dans la nature. Pour être plus précis, je veux dire par là que la notion de temps ne peut faire partie d'une ontologie compatible avec notre connaissance de la nature.²

Nous remarquons que la dernière formule contenant le terme ambitieux d'ontologie est de nature philosophique. Lachièze-Rey n'hésite pas à affirmer en effet que « la théorie de la relativité générale est la théorie de la disparition du temps ». L'argument avancé est le suivant :

L'espace-temps est isotrope ; toutes les directions sont identiques. Aucune ne représente le temps ; aucune ne représente l'espace. Ce n'est que dans notre environnement local que nous pouvons distinguer une dimension particulière, que nous qualifions de temporelle. Elle nous est propre, et ne vaut que là où nous sommes. C'est elle qui joint notre état présent à nos états futurs. Mais elle ne vaut que pour nous., et n'a de pertinence que dans notre environnement. (...) Un autre observateur subit l'écoulement de sa durée propre. Cette dernière n'a pas plus à voir avec la nôtre que la verticale de l'habitant d'Andromède n'a à avoir avec la verticale terrestre : pas de temps défini pour tous et partout, pas plus que de verticale.³

Rigoureusement parlant, Lachièze-Rey devrait dire : pas de temps défini pour tous et partout pas plus que d'espace (et non pas plus que de verticale) pour tous et partout, s'il veut respecter la symétrie de son propos. Il serait plus exact en fait de dire : « pas de définition de repères temporels (passé/futur) pas plus que de repères spatiaux (vertical/horizontal) qui soit commune et valable pour tous et partout ». Lachièze-Rey infère du caractère relatif de l'appréciation du passé et du futur (puisque'elle varie selon les systèmes de coordonnées, et leur « présents propres ») l'abolition du temps. C'est comme si on inférait du fait du caractère relatif des notions d'horizontalité ou de verticalité la disparition de l'espace. Nous y reviendrons.

¹ Carlo Rovelli, *L'ordre du temps*, Flammarion, Paris 2018, p. 130

² Marc Lachièze-Rey *Voyager dans le temps*, Seuil, Paris, 2013, p. 110 et 150

³ « La disparition du temps en relativité », in *Revue de métaphysique et de morale*, 2011/4, n°72, pp 443-449.

Cette négation du temps apparaît clairement dans la théorie de l'univers bloc dont Etienne Klein nous donne une remarquable présentation.

Imaginez que vous êtes dans un train et que vous regardez par la fenêtre. Vous voyez le paysage qui défile et vous vous dites « tiens le paysage défile ». En réalité, le paysage ne défile pas, en tout cas il ne défile pas de lui-même : c'est votre mouvement, plus exactement le mouvement du train dans lequel vous êtes assis, qui crée l'impression que vous avez que le paysage défile, alors même qu'il ne défile pas.

Eh bien les physiciens qui pensent que nous sommes le moteur du temps imaginent qu'il se passe la même chose avec l'espace-temps : l'espace-temps serait comme le paysage traversé par le train. Il ne défilerait donc pas. Et c'est notre mouvement au sein de l'espace, notre déplacement sur nos lignes d'univers, qui créerait en nous l'impression que le temps passe.

Cette conception a un nom : c'est la conception dite de l' « univers-bloc ». Croire en elle, c'est considérer que tous les événements, qu'ils soient passés, présents et futurs, coexistent dans l'espace-temps, qu'il y ont la même réalité, de la même façon que les différentes villes de France coexistent en même temps dans l'espace. Tandis que nous sommes à Montreuil, Brest et Strasbourg existent tout autant que Montreuil, la seule différence entre trois villes étant que Montreuil accueille notre présence, alors que ce n'est ni le cas de Brest ni de Strasbourg, du moins au moment où je vous parle. De la même façon, selon la conception de l'univers-bloc, tout ce qui a existé existe encore dans l'espace-temps, et tout ce qui va exister dans le futur existe déjà dans l'espace-temps. Les événements dis « présents » sont comme les autres, à ceci-près qu'ils sont ceux qui se trouvent se produire là où nous sommes. Le présent ne serait en somme rien d'autre que le lieu de notre présence mobile.

Quant à l'espace-temps il contiendrait l'intégralité de l'histoire de la réalité, que nous ne découvririons que pas à pas. C'est un peu comme pour une partition. Une partition contient l'intégralité d'une œuvre musicale : elle existe sous forme statique, elle n'a pas de temporalité propre mais dès que le morceau qu'elle contient est joué par l'orchestre, elle en acquiert une. En faisant défiler les notes unes après les autres, l'exécution du morceau installe la partition, qui était jusque-là statique, dans un flux temporel.⁴

Quand on lit ce texte, une chose est frappante, c'est, je dirais, le caractère leibnizien de la théorie de l'univers-bloc. Même si l'univers a une histoire, tout est déjà contenu dans premières minutes du big bang... Si la partition est déjà écrite, en effet, alors on retombe dans une vision déterministe complète de la nature. On songe à cette formule célèbre de Simon Laplace :

Une intelligence qui, pour un instant donné, connaîtrait toutes les forces de la nature dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain à ses yeux pour elle et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux.

Or personne aujourd'hui ne souscrirait à une telle vision déterministe. Elle a pourtant en commun avec la conception de l'univers-bloc d'être totalement intemporelle, dans l'absolu, passés et futur n'existent ni l'un ni l'autre en réalité – seul est un éternel présent. Souvenons-nous de Parménide, Platon, Augustin La théorie de l'univers-bloc réintroduit en effet l'idée d'un présent universel, pour un observateur se situant à l'extérieur de l'univers, alors même que la théorie de la relativité rend caduque l'idée d'un présent universel.

⁴ Etienne Klein, « Le temps (qui passe ?) », petite conférence, éd. Bayard, Montrouge 2013, p. 47-49

1.3. Les interrogations d'Einstein lui-même au sujet du présent et de la flèche du temps.

Cette perte d'un présent universel n'était pas d'ailleurs sans poser problème à Einstein lui-même, comme le rapporte Carnap dans une discussion qu'il eut avec lui.

He (Einstein) explained that the experience of the now means something essentially different from the past and the future, but this important difference does not and cannot occur within physics. That this experience cannot be grasped by science seemed to him a matter of painful but inevitable resignation.

Que faut-il entendre par maintenant ? Avec la relativité, la notion de présent n'a plus de signification objective, il n'y a pas un maintenant commun, il faut s'y résigner. Mais précisément le présent n'a jamais qu'une signification subjective. L'instant présent n'est qu'une pure abstraction, il est déjà passé, seul est présent ce qui demeure présent à l'esprit - , comme l'a montré Augustin. Et s'il est subjectif, pourquoi ne peut-il pas être multiple dans l'univers ? Que l'instant présent soit une abstraction n'implique pas que ce qui est futur et passé relativement à cet instant n'existe pas. Ce sont les mesures d'intervalle du temps (entre des instants choisis) qui sont des abstractions. L'irréversibilité du passage du temps, elle, est bien réelle. Des événements adviennent et passent

Car Einstein était conscient qu'on ne pouvait éradiquer l'irréversibilité temporelle de la physique. On cite souvent ce mot d'Einstein aux proches de son ami Besso, peu de temps après la mort

Pour nous physiciens convaincus, la distinction entre le passé, le présent et le futur n'est qu'une illusion, malgré sa persistance

Il n'est pas sûr qu'il faille donner un sens philosophique définitif à ces mots, écrits dans des circonstances douloureuses, en guise de consolation aux proches d'un ami. Car par ailleurs Einstein se posait sérieusement la question de l'irréversibilité du temps dans la nature, mais il résistait à l'idée qu'on pût étendre cette irréversibilité à l'univers entier. Lisons plutôt ce qu'il écrit lui-même à propos de l'irréversibilité d'un signal lumineux :

L'envoi d'un signal lumineux est un processus non réversible au sens de la thermodynamique, un processus qui est lié à la croissance d'entropie, tandis que selon nos connaissances actuelles, tous les processus élémentaires sont réversibles. Si donc A et B sont deux points suffisamment voisins l'un de l'autre et qui peuvent être reliés par une ligne du genre temps, l'énoncé B est avant A a un sens objectif - dans le cas où un signal lumineux est émis de B et reçu par A.

S'inspirant d'un paradoxe que le mathématicien Gödel lui avait soumis, Einstein écrit ensuite :

Cet énoncé (B est avant A) a-t-il encore un sens, si les points qu'on peut relier par une ligne du genre temps sont situés arbitrairement loin l'un de l'autre ? Certainement pas, s'il existe des suites de points temporellement reliés de telle sorte que chaque point précède temporellement celui qui suit, et que la suite est fermée sur elle-même.

La suite est fermée dans le cas seulement où l'univers est fini : dans le cadre de la géométrie de Riemann de la Relativité générale, l'espace peut être considéré à la fois comme sans limite, - comme lorsqu'on parcourt indéfiniment une ligne sur la surface d'une sphère - tout en étant fini, si la courbure de l'espace est positive, auquel cas on peut revenir au point de départ de sa course ; en allant sans cesse vers le futur on finirait par retrouver le passé. Autrement dit, si on arrivait à relier une série de cônes de lumière les uns à la suite des autres le long d'une ligne d'univers, et que celle-ci fasse le tour d'un univers fermé, alors un corps d'épreuve parcourant cette ligne retrouverait le point de départ passé. S'il peut bien y avoir une relation causale chronologique entre différents cônes de lumière proches sur une même ligne d'univers, celle-ci devient, pour une suite complète et

fermée de cônes de lumière, une relation logique intemporelle. Ce paradoxe a été suggéré par Gödel à Einstein :

Pour des points d'univers très éloignés l'un de l'autre au sens cosmologique, la distinction avant-après est supprimée et apparaissent les paradoxes relatifs à la relation causale orientée dont M. Gödel a parlé. Ce sont de telles solutions des équations de la gravitation (avec une constante cosmologique Λ non nulle) que M. Gödel a trouvées

Mais Einstein ajoute, avec honnêteté : *il serait intéressant d'examiner s'il ne faut pas l'exclure pour des raisons physiques*.⁵ – d'autant que Einstein avait posé une constante cosmologique nulle dans sa théorie de la relativité générale étendue à la cosmologie. Le point de vue du physicien n'est pas nécessairement le point de vue du mathématicien, aisément très spéculatif.

Kurt Gödel écrit en effet à Einstein : « J'ai démontré enfin que tu as raison, le temps n'est qu'une vision ». Mais Einstein lui fait remarquer : « On ne peut pas télégraphier dans son passé. Il semble bien qu'il y ait plus d'irréversibilité dans la nature que je ne l'ai soupçonné »

1.4. Des arguments décisifs tirés de la relativité en faveur d'une flèche du temps.

La vitesse limite de la lumière est au cœur de la théorie de la relativité. Elle implique précisément une flèche du temps, sinon dans l'univers entier, du moins dans tous les systèmes locaux (propres à une ligne d'univers) au sein de cet univers. Un signal lumineux mettant un certain temps à parvenir à un observateur le renseigne sur un état nécessairement passé, et jamais sur un état futur.

Ce n'est pas parce qu'on doit abandonner l'idée d'un présent commun, qu'on doit pour autant nier le temps - comme le font Lachièze-Rey et Carlo Rovelli. Pas de présent commun, oui, mais une série d'événements qui font l'histoire d'un système solaire, d'une galaxie, et de l'ensemble des galaxies qui font l'histoire de l'univers, à l'intérieur de laquelle se situe très modestement le présent propre à ma ligne d'univers. Ces événements tissent la temporalité de l'univers... appréhendée différemment par des observateurs dont le présent se rattache à des lignes d'univers différentes (à des référentiels différents), mais cette temporalité comme telle est absolue, et donc non susceptible d'être renversée, ou encore non susceptible d'être intemporellement présente à un observateur extérieur idéal.

La limite de la vitesse des signaux lumineux est notre rempart contre cette inversion du passé et du futur dont la théorie d'Einstein est parfois accusée à tort » faisait remarquer A. Eddington (*Théorie mathématique de la Relativité*, 1923)

Lisons plutôt cette judicieuse remarque de Christophe Bouton

Si la durée mesurée entre deux événements dont l'intervalle d'univers est du genre temps ou lumière varie d'un référentiel à l'autre (à cause de la dilatation temporelle), la relation d'antériorité ou de postériorité reste en revanche invariable. On peut dès lors définir un ordre de succession objectif entre ces événements qui ne peut être inversé. Pour ces événements la distance temporelle est relative, mais l'ordre temporel est absolu. C'est un point crucial. L'intervalle de temps entre ces

5 Extraits des œuvres choisies d'Albert Einstein, sous la direction de Françoise Balibar et de Jacques Merleau-Ponty, 1991, t. 5, p. 117.

*événements est irréductible : il ne peut diminuer mais non disparaître. Dans cette mesure la relativité restreinte confirme l'irréversibilité de la succession causale .*⁶

Nous voyons bien que les rayons lumineux reçus sur la terre sont l'effet de l'activité du soleil (l'émission de photons, sous l'effet de son activité atomique, et de son refroidissement progressif, conformément au second principe de la thermodynamique). L'activité du soleil est la cause de la réception de ses photons sur terre ; on ne peut inverser ici le rapport de cause à effet.

La lumière est la mémoire du monde, elle permet non de prédire mais de rétrodire – selon une formule de Karl Popper. Il n'est rien que je n'observe qui ne soit passé, même si ce que j'observe sera observé plus tard par un autre observateur qui se situe dans le futur de mon cône de lumière. Ce que je ne vois pas encore (et qui est donc à venir pour moi) mais qui est déjà vu par un autre n'en est pas moins dans les deux cas un événement passé. Et d'ailleurs plus on remonte dans le passé de l'univers, plus celui-ci est logiquement commun à tous les observateurs potentiels de l'univers. Tous sont susceptibles d'observer, par exemple, le fond diffus cosmologique

On pourrait ainsi dire, pour paraphraser Augustin, qu'il n'y a pas trois temps qui sont le présent du passé, le présent du présent, et le présent du futur, mais qu'il y a trois temps qui sont le passé passé (dont la lumière ne peut me parvenir, qui est dans mon ailleurs mais qui s'est réellement passé), le passé présent (qui m'est présent, parce que sa lumière nous est parvenue), et un passé encore futur (dont la lumière ne m'est pas encore parvenue). Qui dit passé, dit bel et bien un temps qui passe et ne revient pas. La théorie de la relativité présuppose une irréversibilité temporelle des processus physiques, un voyage unidirectionnel de la lumière, des phénomènes électro-magnétiques en général qui m'informent sur l'univers.

Quant à l'avenir, il n'a de sens que pour le présent qui me lie à une ligne d'univers (sur cette terre, que je peux étendre au système solaire) ou pour le présent d'un autre observateur rattaché à une autre ligne d'univers; l'avenir est relativement imprévisible, comme on le verra, quel que soit le système local où il arrivera. Par exemple je ne sais dans quelle situation seront les planètes autour du soleil dans dix millions d'année. Mais ce futur n'est encore connu de personne. Tout au plus se trouvera-t-il dans un avenir pour un observateur éloigné de moi – s'il se situe dans la région future de mon cône de lumière, - mais il ne peut lui être déjà présent. *Ce n'est pas le futur qui est déjà présent, mais c'est le présent qui est encore futur* – résume Christophe Bouton (ibidem, p. 141)

Le fait que le temps soit une coordonnée de l'espace-temps dans la Relativité n'implique pas une réversibilité des phénomènes mesurés. Le temps n'est pas une coordonnée supplémentaire de l'espace, c'est une coordonnée distincte qui s'ajoute aux trois autres de l'espace. Il n'y a pas de spatialisation du temps - contrairement à ce qu'alléguait Bergson, dans *Durée et Simultanéité*.

Meyerson insiste avec raison sur l'erreur de maints exposés de la Relativité, où il est question de la « spatialisation du temps ». Le temps et l'espace sont bien fondus dans un même et unique continuum, mais celui-ci n'est pas isotrope. Les caractères de l'élément de distance spatiale et ceux de l'élément de durée restent distincts les uns des autres, écrit Einstein (La Relativité, Payot, p. 165)

Il y a bien une irréversibilité des phénomènes telle qu'on ne peut intervertir leur passé et leur futur – même s'il n'y a aucun présent dans l'absolu - ni affirmer que le futur est déjà écrit et

⁶ Le futur peut-il être présent ? La théorie de la relativité restreinte et la théorie de l'univers-bloc, in *Temps de la Nature, nature du temps*, CNRS éditions, 2018, p. 129-130. C'est à Christophe Bouton que nous devons la citation d'Eddington.

susceptible, en soi, d'être déjà connu. L'affirmation selon laquelle l'univers constitue un bloc où la distinction passé/présent/futur n'a pas lieu d'être, ou selon laquelle, dans l'absolu, il n'y a pas une irréversibilité des événements qui s'y produisent nous paraît irrecevable, du point de vue de la physique elle-même.

L'image d'Etienne Klein prête donc à discussion : on a l'impression que le paysage défile, mais c'est moi qui défile, alors que le paysage serait en lui-même statique. Non, le paysage que j'observe est bel et bien dynamique, il est en mouvement – il suffit de songer à l'éloignement des galaxies les unes des autres pour tout observateur quel qu'il soit - au même titre que je suis en mouvement en son sein.

Revenons à ce que disait Einstein plus haut : *L'envoi d'un signal lumineux est un processus non réversible au sens de la thermodynamique, un processus qui est lié à la croissance d'entropie.* Toute la question est précisément de savoir quelle est la place qu'on accorde au second principe thermodynamique en cosmologie. Le refroidissement progressif de l'univers depuis cet instant du *big bang* où il était extrêmement dense et extrêmement chaud obéit bien au second principe thermodynamique. A la faveur de ce refroidissement une histoire pour le moins mouvementée s'est déployée avec la formation d'étoiles, de galaxies, et autour d'étoiles de planètes froides, susceptibles éventuellement d'y voir apparaître des corps très complexes, comme les êtres vivants, etc. Il nous faut donc aborder le second principe de thermodynamique, et voir en quoi il impose une direction du temps non seulement à des phénomènes locaux, mais aussi peut-être à l'univers entier.

2. D'une possible affirmation du temps (et de son irréversibilité) à partir d'une relecture des rapports entre contingence et nécessité.

2.1. Le second principe de thermodynamique.

Il se trouve qu'il est des processus physiques qui, comme les processus biologiques, ne peuvent être temporellement inversés : le passé et le futur n'y sont pas interchangeables. Ce sont ceux qui concernent les phénomènes *thermiques*, la déperdition de la chaleur, le refroidissement d'un système laissé à lui-même, et suffisamment isolé de son environnement, auxquels on s'est intéressé quand on s'est penché sur l'utilisation mécanique de la chaleur, et qu'on s'est préoccupé par exemple de la façon d'optimiser le rendement d'une machine à vapeur. Sadi Carnot (1796-1832) est le premier à mettre en évidence le cours irréversible d'une déperdition inéluctable d'énergie avec le temps. Il est le créateur de cette nouvelle discipline, la thermodynamique, dont Rudolf Clausius (1822-1888), à sa suite, précisera les lois fondamentales.

La première loi (ou premier principe) de la thermodynamique établit la conservation de l'énergie lors des transformations d'une énergie en une autre. « Rien ne se perd, rien ne se crée ». La seconde loi (ou second principe) montre que de façon générale, la chaleur passe d'un corps chaud vers un corps froid, que tout réchauffement suppose une source d'énergie et, d'autre part, que les transformations d'énergie en une autre énergie ne peuvent se faire que dans un sens, un sens qui ne peut donc être inversé dans le temps. Par exemple l'énergie thermique se transfère en énergie cinétique (comme dans le cas d'une locomotive à vapeur, ou d'un moteur à explosion) ; l'énergie cinétique elle-même se transfère en énergie thermique (comme dans le cas du frottement des roues sur les rails ou des pneus sur la route) ; mais celle-ci n'est pas réutilisable sous forme d'énergie cinétique.

Le second principe de la thermodynamique, tel que Clausius l'a donc formulé, dit que l'entropie d'un système dynamique (isolé) croît nécessairement avec le temps – l'entropie définissant le degré de désorganisation d'un système, ou de dispersion de son énergie. La notion d'entropie est délicate,

car elle renvoie aux notions d'ordre et de désordre dont on sait combien elles posent déjà problème au philosophe. Nous pouvons ici songer à Spinoza qui en soulignait le caractère anthropomorphique ou à Bergson qui en montrait le caractère totalement relatif.

Dans un premier temps, prenons les notions d'ordre et de désordre (et donc d'accroissement d'ordre ou de désordre dans le temps) telles qu'elles se présentent à nous intuitivement pour éclairer ce fameux second principe. On peut admettre que lorsqu'on comprime volontairement un gaz (de l'air, par exemple) dans une pompe, pour en utiliser son énergie cinétique (gonfler un pneu ou un matelas pneumatique), on lui impose un ordre, et que si on relâche la pression, spontanément le gaz va se refroidir et se dilater (à l'intérieur de la pompe), et perdre l'ordre qu'on lui a donné. Un moteur à explosion d'une voiture ne peut faire autre chose que s'arrêter et se refroidir, s'il n'y a plus d'essence pour provoquer une explosion, et donc si son système n'est pas régulièrement entretenu. On peut donner mille et un exemples illustrant l'entropie d'un système dynamique laissé à lui-même, isolé d'un environnement (en particulier d'un environnement humain). On n'a jamais vu en effet un puzzle dont les pièces ont été dispersées par le vent se reconstituer spontanément. Mais dans ces exemples c'est l'homme qui a imposé un ordre à un système dynamique ou qui y remet de l'ordre. On peut donc dire ici que les notions d'ordre et de désordre ont un caractère anthropomorphique.

Mais l'homme fait partie de la nature. Et en tant qu'être vivant, en tant qu'organisme, il est un être en effet très organisé, et capable d'instaurer des systèmes organisés (artificiels). Vous voyez d'ailleurs que par là même il est aussi source d'un accroissement de désordre dans la nature : l'utilisation des ressources énergétiques de la terre contribue à un accroissement de la température de l'atmosphère, et aux désordres qui s'ensuivent – et cela conformément aux lois de la thermodynamique

Dans la nature, si on prend précisément un organisme vivant, qui est « un tout organisé s'organisant lui-même » - pour reprendre une définition de Kant -, on constate que celui-ci maintient sans cesse son ordre en renouvelant continuellement ses apports énergétiques, et ce pour aller à l'encontre de sa tendance fondamentale, inéluctable, à disperser une énergie non récupérable... jusqu'à s'épuiser et mourir. Ainsi les phénomènes vivants, comme tous les phénomènes physiques, n'échappent pas à l'accroissement inéluctable d'entropie d'un système isolé. Un individu est un système relativement isolé dans le monde vivant, mais... il est susceptible de se reproduire ! il n'est pas isolé de l'espèce, qui maintient à travers le temps son ordre, tout en étant elle-même susceptible de disparaître à son tour, au sein de la lutte pour la vie... Le vivant est une illustration parfaite de cette corrélation inextricable d'accroissement d'ordre au prix d'un accroissement de désordre, ou d'un accroissement d'ordre à la faveur d'un état de désordre.

Un système dynamique ne tend vers le désordre que s'il est isolé. Or aucun système dynamique n'est parfaitement isolé dans la nature : les échanges d'énergie entre des systèmes dynamiques sont tels qu'une création d'ordre ici est compensée par un accroissement de désordre là, et inversement. L'histoire de l'univers semble donner lieu à autant de processus néguentropiques – ainsi de la configuration relativement ordonnée du système solaire au sein duquel a pu émerger des molécules complexes, et par exemple des molécules se combinant pour former une chaîne d'ADN – que de processus entropiques – ainsi de l'explosion d'une étoile en supernova détruisant toutes les planètes qui pouvaient tourner autour d'elle, ou de la formation d'un trou noir au centre d'une galaxie.

Il est une façon d'affiner les notions d'ordre et de désordre, en les reliant aux notions d'information et d'absence (relative) d'information. Un état ordonné exige un degré d'information beaucoup plus grand qu'un état désordonné. Il faut infiniment plus d'informations pour décrire une

araignée ou un chat que pour décrire un gaz à l'état d'équilibre, ou même la combustion par une étoile de son hydrogène. On peut suivre ici l'astronome américain contemporain, Leonard Suskind, qui relie la notion d'entropie à celle d'informations cachées. L'entropie d'un système dynamique est d'autant plus grande que notre information est pauvre quant à la constitution (microscopique) de son état ; elle décroît quand notre information sur son état (macroscopique), aussi complexe soit-il, augmente. Un état est d'autant plus organisé qu'il est complexe, et comme tel d'ailleurs difficilement prévisible, et d'autant moins organisé qu'il s'éloigne de la complexité, tel l'état relativement simple d'un gaz en équilibre, en revanche aisément prévisible lorsqu'on laisse un gaz se répandre dans un contenant (ou dans l'atmosphère). La description de cet état simple ne peut être que globale – elle donne lieu à un calcul de probabilité ; en cela elle masquerait en réalité une ignorance.

Pour bien comprendre tout cela, il faut savoir que le mathématicien autrichien, Boltzmann - né en 1844 et mort en 1905 - eut l'idée de poser le problème de l'entropie (d'un système isolé), ou de l'accroissement progressif de son désordre, en termes de mécanique statistique. Il est parti de l'hypothèse, proposée par Maxwell, que la chaleur d'un corps (d'un liquide, d'un gaz par exemple) est l'effet de la vitesse des particules à l'intérieur de ce corps ; lorsque le corps se refroidit, les particules en mouvement ralentissent - hypothèse qui a été expérimentalement vérifiée ultérieurement. S'il est impossible de connaître l'état de chaque particule (d'un gaz ou d'un liquide) en mouvement prise isolément, en revanche il est possible de prévoir globalement l'évolution du gaz, et donc d'un ensemble de particules, en s'appuyant sur des calculs de probabilité.

Considérons l'évolution cinétique d'un gaz, par exemple. Prenons deux pièces fermées contiguës, dont on remplit l'une d'un gaz (d'air par exemple), l'autre étant vide de ce gaz. Si on permet soudain le passage du gaz d'une pièce à l'autre, on sait que le gaz va se répandre uniformément dans les deux pièces, en vertu du second principe de la thermodynamique : l'entropie du système isolé augmente, il tend irréversiblement vers un état d'équilibre indifférencié. Un gaz est composé d'un très grand nombre de particules. Il est donc impossible de connaître la position et la vitesse de chaque particule individuellement. En revanche, on peut déterminer la probabilité d'évolution globale du système : la probabilité de distribution dans le temps et l'espace de l'ensemble des particules du gaz (ici dans deux pièces ouvertes l'une à l'autre, mais formant ensemble un système isolé). La probabilité que la quantité N particules de gaz enfermés au départ dans la pièce n°1 est égale à $N/2$ dans chacune des deux pièces, une fois qu'on l'a laissé se répandre dans les deux pièces. La probabilité que le gaz revienne dans son état initial – retourne se comprimer dans la pièce n°1 - est nulle (ou quasi nulle).

2.2. Des tentatives discutables d'interpréter le second principe de la thermodynamique dans le sens d'une éradication du temps de la physique.

Boltzmann obtenait paradoxalement une équation décrivant un processus irréversible en termes statistiques, à partir d'équations de la mécanique classique décrivant des phénomènes (en droit) réversibles. On ne manqua pas de souligner ce paradoxe et d'en faire l'objection à Boltzmann, en s'appuyant, entre autres, sur le théorème de récurrence de Poincaré. Selon ce théorème, tout état d'un système dynamique classique (c'est-à-dire régi par les lois de la mécanique newtonienne) revient, au bout d'un temps, qui peut être certes très long, aussi près que possible de son point de départ. Rien n'empêche donc, en droit du moins, à un système quelconque de revenir quasiment à son état initial.

Mais justement, il y a dans l'objection d'un Poincaré la persistance à vouloir absolument intégrer les lois de la thermodynamique dans le cadre général des lois de la mécanique classique, et à plaquer un idéal d'intemporalité mathématique sur la temporalité d'une réalité physique irréductible – partageant ainsi le platonisme implicite des fondateurs de la physique moderne auquel nous avons

déjà fait allusion : la vérité donnée par la loi est intemporelle, les phénomènes observés sont temporels ; l'une nous situerait du côté de l'essence des choses, les autres du côté de leur apparence.

Si nous relient les notions d'entropie et de négentropie à celles d'absence d'information et de possession d'information, on peut émettre l'idée que la mécanique statistique appliquée à la thermodynamique et à son second principe masque notre ignorance quant à l'irréversibilité véritable des processus physiques décrits. Les équations de Boltzmann révèlent l'existence d'un « flou » concernant la tendance irréversible d'un système isolé vers le désordre, désignée par le concept d'entropie, comme le remarque Carlo Rovelli :

L'origine de la probabilité considérée par Boltzmann est notre ignorance – écrit-il. Or à première vue, l'idée que notre ignorance puisse impliquer quelque chose concernant le comportement du monde semble déraisonnable. (Sept brèves leçons de physique, p. 64)

Le déficit d'informations que trahit une approche statistique porterait sur l'intemporalité fondamentale des phénomènes, en deçà ou au-delà de leur temporalité apparente. La mécanique statistique a seulement montré que l'irréversibilité est simplement probable, alors qu'il reste à démontrer qu'elle est nécessaire.

Boltzmann, sensible aux arguments de Poincaré, repris par le physicien Zemerlo à son encontre, s'interroge lui-même sur le caractère improbable dans l'univers de ce cours irréversible des événements dont nous faisons localement l'expérience dans notre minuscule région de l'univers.. Boltzmann partageait cette idée qu'en même temps que l'univers tendait irrémédiablement vers un état d'équilibre et vers ce que Clausius appelait sa mort thermique – en vertu du second principe de la thermodynamique. Sur la surface terrestre en revanche, l'émergence du vivant constitue un état improbable défiant cette direction du temps. Il peut exister des systèmes locaux où la flèche du temps est inversée, conformément à la réversibilité des phénomènes au regard généralement des lois de la physique, en ce sens qu'ils s'éloignent de la visée d'un état d'équilibre indifférencié. Il n'y aurait donc pas qu'une seule direction du temps possible.⁷

Boltzmann est mort en 1905, bien avant la découverte de l'expansion de l'univers et des théories cosmologiques qui sont devenues des « cosmogonies », lesquelles nous montrent que l'univers ne tend nullement vers un état d'équilibre, et qu'il existe bel et bien un changement unidirectionnel de l'univers depuis un état initial – le *big bang* – vers un état à venir inconnu (soit une expansion indéfinie, soit un effondrement de l'univers sur lui-même (le *big crunch*), et qu'il est allé bien davantage d'un état de désordre initial vers l'émergence d'états plus ordonnés. Car la fuite des galaxies ne révèle pas simplement une évolution de l'univers, elle accompagne au sein des galaxies une série d'événements qui font une histoire, avec la naissance et l'extinction d'étoiles, la constitution de planètes entraînée par la formation d'une étoile, l'émergence de molécules complexes à partir d'une variété d'atomes fabriqués au cœur des étoiles. Tout se passe comme si un combat titanesque était livré entre des forces allant vers le désordre (à l'image de la formation de trous noirs) et des forces permettant l'émergence d'états ordonnés complexes, et que celles-ci l'emportaient au bout du compte sur les premières.

En dépit de la découverte de l'observation d'une dynamique de l'univers, mais en accord avec la théorie de l'univers-bloc, Carlo Rovelli continue de défendre l'idée que l'irréversibilité du temps est subjective, qu'elle est un effet de perspective - « la perspective de créatures qui le sont qu'une partie

⁷ *La quête inachevée* (1974), trad. fr Calman Levy, Press pocket (1989), p. 22

du monde » - comme le disait Boltzmann. L'entropie « mesure quelque chose qui nous concerne, davantage qu'elle ne concerne le cosmos », qui résulte de notre interaction avec le monde, mais non le monde lui-même, dit encore Carlo Rovelli (*L'ordre du temps*, op. cit. p. 179) allant dans le sens de ce que disait Hans Reichenberg, dans un ouvrage de référence (*The Direction of Time* (1956), p. 128) :

« There is no logical necessity for the existence of a unique direction total time (...) Boltzmann has made it very clear that the alternation (l'inversion) of time direction represents no absurdity. He refers our time direction to that section of the entropy curve on which are living.

Pourquoi la chaleur va-t-elle des objets chauds aux objets froids, et pas inversement ? – demande C. Rovelli. C'est là une question cruciale, car elle concerne la nature même du temps. Dans tous les cas où il n'y a pas d'échange de chaleur, ou bien lorsque la chaleur échangée est négligeable, le futur se comporte exactement comme le passé. Par exemple, pour le mouvement des planètes dans le système solaire, les planètes pourraient bouger en sens inverse sans qu'aucune loi physique ne soit violée. De même tant qu'il n'y a pas de frottement, un pendule continue à osciller à l'infini.

2.3. Les théories du chaos

L'argument utilisé par Carlo Rovelli est justement très contestable, si on prend en considération les théories du chaos.

On pourrait inverser le cours des planètes sans qu'aucune loi physique soit violée. Soit. Cependant si elles suivent ce cours, cela provient d'une histoire ; il est consécutif à la formation du système solaire... ce qui explique qu'en dehors de Vénus toutes les planètes tournent dans le même sens, et quasiment sur le même plan... De plus, Carlo Rovelli parle de frottements – « tant qu'il n'y a pas de frottements un pendule continue à osciller à l'infini ». Eh bien justement, on peut parler de frottements au sein du système solaire, ce qui va avoir une incidence sur son cours, et ce de façon irréversible

L'astronome Halley, contemporain de Newton - à qui on doit des tables astronomiques remarquables qui lui avaient permis de prévoir le retour de la comète qui porte son nom - démontrait déjà, en reprenant le calendrier passé des éclipses de lune tenu dans l'antiquité, que les dates répertoriées par les Anciens confirmaient bien les lois de Newton – elles devaient permettre de connaître aussi bien l'état passé que l'état de futur de l'univers, comme dirait Laplace. Elles les confirmaient, mais pas aussi parfaitement qu'on aurait pu l'escompter : on constatait un petit décalage entre les lieux où ont été observés des éclipses de lune et ceux qu'on pouvait supposer au vu des stricts calculs dérivés de la loi de Newton, comme si la rotation terrestre ralentissait, fût-ce d'une manière infime. Or cela s'expliquait mécaniquement par l'effet des forces de frottement agissant sur la terre (les mouvements de la mer, les marées qui sont à leur tour un effet de la force d'attraction de la lune sur la terre). Nous savons aujourd'hui que la Lune s'éloigne de la Terre d'environ 3 mètres par siècle et la rotation de la terre s'allonge dans le même temps d'environ 2 millisecondes. Sur un million d'années, le rallongement de la durée de la rotation de la terre devient significatif. Les observations de Halley préfiguraient lointainement les travaux de Poincaré, au sujet de la stabilité du système solaire, qui l'ont amené aux théories du chaos.

Que disent les théories du chaos ? Qu'un système dynamique est sensible aux données initiales. A peine ces données initiales (les mesures de son état initial) varient que la prévision de son état futur change. Ce qui revient à dire que le système dynamique en question est à terme imprédictible. Plus nous avons des informations sur des données initiales d'un système dynamique, plus il sera prédictible à terme. Mais cette information ne pourra jamais être complète : le nombre de chiffres après une virgule est potentiellement infini ; tout calcul est une simplification. On connaît l'histoire

du météorologue Lorenz, dans les années 60. Il avait repris ses travaux de la veille, il arrondit quelques chiffres pour simplifier les calculs, et, surprise, les prévisions, sur quelques jours seulement, n'étaient plus du tout les mêmes que celles qu'il avait trouvées la veille. Il illustre parfaitement ce qu'avait découvert Poincaré au début du siècle (lequel mentionnait déjà l'exemple de la prévision météorologique). On cite d'ailleurs souvent l'exemple de la météorologie avec le fameux « effet papillon », selon une formule qui vient de Lorenz lui-même: « Le battement d'ailes d'un papillon au Brésil peut-il provoquer une tornade au Texas ? » - titre d'une conférence qu'il avait donnée en 1972.

Je donnerais un autre exemple : le moindre écart de la queue du billard par rapport au point central de la boule, au départ de son lancer, rend les coups gagnants rares et de manière générale la prévision du jeu difficile, ou valable seulement à très court terme. Si jeu il y a, c'est que une part de hasard incontrôlable s'y invite. Avant d'analyser cette notion problématique de hasard, source de désordre apparent et d'imprédictibilité, il faut savoir qu'il existe des systèmes dynamiques simples qui ne sont pas chaotiques, quand nous avons affaire, dans un système relativement isolé, à deux forces seulement en présence. C'est le cas par exemple d'un pendule où agissent verticalement la gravité et horizontalement le mouvement que j'imprime au pendule : il oscillera régulièrement, même si initialement je lui ai donné une impulsion de manière maladroite, et que j'ai été approximatif dans mon geste ; il finira par se stabiliser dans son oscillation. Il n'est pas sensible aux données initiales. Approchez un aimant du pendule, amenez l'intervention d'une troisième force, le comportement du pendule, s'étendant alors dans les trois dimensions de l'espace, devient complètement chaotique.

Regardons maintenant le système solaire. Si nous prenons seulement deux corps, la Terre et la Lune, s'attirant donc en raison directe de leurs masses respectives, et en raison inverse du carré de leur distance, ils suivent l'un par rapport à l'autre des révolutions parfaitement stables – du moins si nous faisons abstraction des frottements et du phénomène des marées, justement. De manière générale si on prend en compte la révolution d'une planète autour du soleil, sa trajectoire est descriptible pour l'éternité ; dès qu'on prend en compte l'influence d'une autre planète tournant aussi autour du soleil, les choses ne sont descriptibles qu'à court terme. Chose qu'a démontrée Poincaré.

En réalité, la question de la stabilité du système solaire s'est posée très tôt ; elle s'est posée déjà à Newton. On aurait pu escompter que les mouvements des astres dans le système solaire allaient perdurer indéfiniment, comme un pendule sans frottement peut osciller à l'infini. C'est ce que Newton envisageait en effet - à condition que Dieu remette de temps en temps les pendules de l'univers à l'heure. Lisons plutôt :

Toutes les planètes se déplacent d'une seule et même manière sur des orbites concentriques, à l'exception de quelques irrégularités qui peuvent résulter des actions mutuelles des comètes et des planètes, qui sont aptes à croître, jusqu'à ce que ce système nécessite une révision, écrit Newton, dans le Traité d'optique.

A vrai dire, l'influence du mouvement des comètes est comme nulle – mais on les découvrait seulement au XVIIIe et on ignorait encore grandement leur nature. L'influence des planètes les unes sur les autres contribuent en revanche à l'instabilité du système solaire. Aux XVIIIe et XIXe siècles, les mathématiciens Lagrange puis Laplace ont affiné les méthodes mathématiques pour parvenir à intégrer davantage les irrégularités du système solaire, y compris par des méthodes statistiques (la fameuse citation de Laplace est tirée d'un essai sur les probabilités), jusqu'à ce que Poincaré prouve définitivement que le système solaire est instable, et que son comportement à long terme est

chaotique et donc imprédictible. Sur les traces de Poincaré, les récents travaux de Jacques Laskar montrent que dans un temps assez court, relativement à la durée de vie du soleil, c'est-à-dire dans une dizaine de millions d'années, la position respective des planètes entre elles et autour du soleil devient totalement imprévisible.⁸

Le système solaire n'est pas stable, et le futur ne se comporte comme le passé que sur une très courte échelle de durée de son histoire (fort longue relativement à la vie de l'homme sur terre) ; en réalité à l'échelle du temps cosmique, le futur n'est pas interchangeable avec le passé, le phénomène observé n'est pas réversible. De même, tant qu'il n'y a pas de frottement, en effet un pendule continue à osciller indéfiniment, dans des conditions idéales d'expérience qui ne sont jamais réunies. On peut donc rétorquer à Carlo Rovelli que, de même qu'à un instant t , au niveau microscopique, on ne voit pas de direction temporelle du mouvement des particules de gaz, qui au niveau macroscopique s'étend dans l'espace pour être en état d'équilibre, de même à un instant t , dans le mouvement des planètes autour du soleil, on n'y détecte aucune orientation temporelle nécessaire. D'un point de vue physique, il ne s'agit pas des mêmes phénomènes, mais d'un point de vue épistémologique, nous pouvons dire que c'est chaque fois notre (relative) ignorance sur l'état des données infinitésimales d'un système dynamique à un instant initial t qui explique notre incapacité de prévoir son état global futur à terme, et qui rend illusoire l'affirmation de son intemporalité.

2.4. Contingence et nécessité dans la nature.

Interrogeons-nous à présent sur le rôle éventuel du hasard dans cette imprédictibilité effective. Regardons à comment Henri Poincaré présente lui-même la théorie du chaos :

*Une cause très petite, qui nous échappe, détermine un effet considérable que nous ne pouvons pas ne pas voir, et alors nous disons que cet effet est dû au hasard. Si nous connaissions exactement les lois de la nature et la situation de l'univers à l'instant initial, nous pourrions prédire exactement la situation de ce même univers à un instant ultérieur. Mais, alors même que les lois naturelles n'auraient plus de secret pour nous, nous ne pourrions connaître la situation initiale qu'approximativement. Si cela nous permet de prévoir la situation ultérieure avec la même approximation, c'est tout ce qu'il nous faut, nous disons que le phénomène a été prévu, qu'il est régi par des lois ; mais il n'en est pas toujours ainsi, il peut arriver que de petites différences dans les conditions initiales en engendrent de très grandes dans les phénomènes finaux ; une petite erreur sur les premières produirait une erreur énorme sur les derniers. La prédiction devient impossible et nous avons le phénomène fortuit.*⁹

Nous pouvons clairement opposer ce texte au fameux texte de Laplace décrivant parfaitement l'idéal déterministe de la science classique. « *Une intelligence qui, pour un instant donné, connaîtrait toutes les forces de la nature dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent (...) embrasserait dans la même formule les mouvements des grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome* ». Précisément cette connaissance à un instant donné est totalement impossible. Et à la limite même à une intelligence divine, ou en tout cas à une intelligence mathématique parfaite. C'est donc l'idéal déterministe, que Laplace a le mérite d'énoncer en termes limpides, qui semble bel et bien remis en question. Or celui-ci est posé de manière intemporelle : *pour elle – pour cette intelligence - l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux.*

Bien évidemment, au regard de cette vision intégralement déterministe, le hasard n'existe pas, ou plus exactement il recouvre notre ignorance de causes existant nécessairement. Comme dirait

⁸ J. Laskar, « La stabilité du système solaire », in *Chaos & déterminisme*, Seuil « Points Sciences », 1992
⁹ *Science et Méthode*, éd. Kimé, 1999, p. 62.

Voltaire : *Ce que nous appelons hasard ne peut être que la cause ignorée d'un effet connu*. On sait qu'au XVIII^e siècle sont énoncées des conceptions à la fois parfaitement mécanistes et parfaitement déterministes de la nature (on songe ici à Helvetius, à d'Holbach, et, dans une moindre mesure à Diderot – beaucoup moins dogmatique que ces derniers – et à son *Jacques le fataliste*. Laplace est dans leur sillage. Nous nous en tiendrons à ce que dit Spinoza : « Nous n'appelons des choses contingentes qu'en raison de l'insuffisance de notre connaissance ».

Qu'apporte à cet égard les théories du chaos ? Elles impliquent une temporalité : la négation de l'intemporalité (ou de la perpétuité) d'un état stable. Disent-elles pour autant qu'il y a objectivement des phénomènes fortuits et donc de la contingence dans la nature ? « Nous avons le phénomène fortuit » dès lors qu'il devient rigoureusement imprédictible », dit Poincaré. Mais les théories du chaos restent déterministes, et Poincaré serait le premier à le dire ; simplement elles montrent les limites de prédictibilité d'un système dynamique, à l'intérieur même d'un cadre déterministe. Car qu'on ne puisse pas prévoir rigoureusement, dans ses détails, l'état futur d'un système dynamique, n'empêche pas de prévoir son évolution globale. Edward Lorenz remarquait : « Avec les années, les minuscules perturbations n'augmentent ni ne diminuent la fréquence des événements météo comme les tornades. Le plus qu'elles puissent faire est de modifier l'ordre dans lequel ces événements se produisent ». Si on prend un exemple plus simple, celui du système solaire, on sait ce qu'advient nécessairement le soleil, dans 5 milliards d'année ; connaissant sa masse relative, on sait que notre étoile deviendra une géante rouge... avant de s'éteindre définitivement.

Il n'empêche que la notion de déterminisme se complexifie et s'affine considérablement, et qu'on doit l'intégrer dans une temporalité effective. Pourquoi d'abord devons-nous toujours parler de déterminisme ? Nous ne savons pas dans un million d'années quelle sera la position respective des planètes autour du soleil, ni celle des satellites gravitant autour de certaines planètes. Transposons-nous dans dix millions d'années, avec le savoir et les méthodes scientifiques que nous possédons aujourd'hui, nous pourrions prévoir, à court terme en tout cas, très exactement par exemple une éclipse d'un satellite autour d'une planète (quand celle-ci s'interposera entre son satellite et le soleil). Le phénomène est parfaitement déterminé. Sauf que notre incapacité – irréductible – à connaître parfaitement les données d'un système dynamique à un instant t nous empêche de prévoir son état futur, certes non à court terme, mais à moyen et à long terme. Mais le terme « irréductible » est important. Car il est mathématiquement impossible de décrire parfaitement l'état initial d'un système dynamique, un tant soit peu complexe (il n'a pas besoin de l'être beaucoup, il suffit qu'on soit en présence de l'influence de trois facteurs seulement). L'infiniment complexe ne peut être parfaitement réductible à du simple, entendons à du parfaitement calculable, selon l'idéal cartésien qui sous-tend la constitution de la science moderne (et songeons à la seconde règle de la méthode, dans le *Discours de la Méthode*).

Qu'est-ce que cela implique ? Que notre vision déterministe de la nature découle de l'idéal (légitime) de la mathématisation de la physique. Celui-ci est donc imposé par des impératifs méthodologiques, dont on a pu en effet vérifier l'efficacité gnoséologique. Mais ils n'impliquent pas que le déterminisme exigé par la science physique, et les sciences de la nature en général, ait nécessairement une signification ontologique – Kant nous a mis en garde contre une telle tentation. Si je tombe du haut de la tour Eiffel, nécessairement je vais m'écraser au sol, en vertu de la loi de la chute des corps, mais il n'est pas dit que je devais tomber nécessairement de la tour Eiffel. Un événement insolite, imprévisible s'intègre à l'intérieur de lois régissant par ailleurs de phénomènes de la nature, au regard desquels certains événements sont en effet impossibles. Mais cela n'empêche pas que de multiples possibles s'inscrivent à l'intérieur de processus nécessaires. Prenons un exemple simple : que demain, moi qui attends un enfant, j'attende une fille plutôt qu'un garçon,

cela relève du hasard, même si le processus de fécondation s'est conformé aux lois de la biologie, et que nécessairement mon enfant héritera de 50% des gènes de sa mère et de 50% des gènes de son père. Pourtant le hasard s'invite dans le jeu de leur combinaison de sorte qu'aucun individu biologique – en dehors des jumeaux homozygotes – n'est identique. Et, nous savons que si je pouvais faire mille enfants, j'aurai au bout du compte à peu près 500 filles et 500 garçons. Nécessité à grande échelle, contingence à petite échelle.

Revenons maintenant à la théorie du chaos. Nous pouvons dire en effet que l'état t_n d'un système dynamique relativement à t_1 , s'il est relativement éloigné de t_1 , est imprédictible, tout ayant poursuivi un processus nécessaire, sauf que le processus de relation entre une cause et un effet n'est pas linéaire et simple. Ce que Poincaré a justement mis en évidence, c'est que les équations exigées pour décrire l'évolution d'un système dynamique chaotique sont non-linéaires. En simplifiant, on peut les représenter selon le graphique schématisé d'un tronc se déployant d'abord en deux branches, chacune d'entre elle à son tour se divisant en deux autres branches, et ainsi de suite à l'infini ; chaque branche représente un possible, les possibles se multiplient ; au bout du compte une seule ligne de possibles les reliant aura été réalisée, ligne qu'on ne peut connaître *a priori* mais qu'on découvre *a posteriori*. Cela donne tout son sens à cet énoncé de Bergson (dans la *Pensée et le mouvant*, p. 109) :

Au fond des doctrines qui méconnaissent la nouveauté radicale de chaque moment de l'évolution il y a bien des malentendus, bien des erreurs. Mais il y a surtout l'idée que le possible est moins que le réel, et que, pour cette raison, la possibilité des choses précède leur existence. Elles seraient ainsi représentables par avance, elles pourraient être pensées avant d'être réalisées. Mais c'est l'inverse qui est la vérité.

Ce n'est qu'après coup, après que le temps ait fait son œuvre, qu'on peut dire qu'un possible au milieu de multiples autres, était nécessaire. Si on met en avant la nécessité d'un phénomène – il ne pouvait être autrement – c'est au passé qu'on l'envisage, une fois le phénomène advenu. *Remettons le possible à sa place : l'évolution devient tout autre chose que la réalisation d'un programme* – dit encore Bergson. Mais croire alors à la nécessaire nécessité d'un phénomène, c'est être encore attaché subrepticement à un préjugé téléologique, c'est penser que son état présent est le produit d'un état passé, comme s'il résultait d'une programmation préalable, quand c'est l'avenir qui nous fait découvrir le présent

Le hasard se loge au cœur de la nature, sans contredire la nécessité mais en s'y insérant, et ce au point de rendre l'état futur d'un système dynamique imprédictible et, par conséquent, de rendre la nouveauté possible. Comme le dit Hubert Reeves :

*Les développements récents de la physique et, en particulier, la naissance de la théorie du chaos, nous permettent de comprendre comment les lois coexistent avec la dimension ludique de la nature, et comment la présence simultanée de deux pôles « hasard » et « nécessité » est indispensable à l'inventivité et à la créativité du monde*¹⁰

On peut toujours soupçonner le hasard invoqué dans le cadre des théories du chaos de masquer notre ignorance, ou d'être révélateur des limites de la connaissance; car on reste dans l'horizon de la physique classique déterministe – abstraction faite des réserves que nous venons d'émettre. En physique quantique, le physicien a de toute façon affaire à des données d'emblée aléatoires, à un hasard objectif qu'il ne peut pas mettre sur le compte de l'ignorance de paramètres cachés (souvenons-nous de la fameuse discussion entre Einstein et Bohr) ; ce qui ne l'empêchera pas

10 *Malicorne*, éd. Seuil, 1990, p. 102.

par ailleurs de prévoir rigoureusement des états globaux (le comportement d'un ensemble de particules élémentaires par exemple). Hasard *et* nécessité.

Contentons-nous d'un exemple simple. On sait que le rythme de l'émission discontinue d'un rayonnement bêta ou gamma d'un isotope radioactif est totalement aléatoire. Or imaginons que je sois au contact d'un tel rayonnement radioactif ; il se peut que je développe un cancer ; si je développe un cancer, on pourra établir un lien de nécessité entre le rayonnement radioactif auquel j'ai été soumis et l'apparition de mon cancer ; mais il se peut aussi que je ne développe pas de cancer. Cela tient à de multiples raisons, dont ma constitution physiologique certainement, mais aussi peut-être au caractère aléatoire du rythme de la désintégration de l'isotope radioactif que j'ai approché à un moment plutôt qu'à un autre. Preuve encore une fois que des relations nécessaires n'excluent pas de multiples possibles, dès lors que le hasard s'y mêle, même si un seul possible se réalisera.

Ce mariage entre hasard et nécessité apparaît clairement dans le monde vivant, on a toutes les raisons de penser qu'il est au cœur de la nature, et des processus physiques, sinon on ne comprendrait pas l'extraordinaire inventivité de la nature, et l'émergence au cours de l'histoire de l'univers d'éléments toujours plus complexes (depuis les particules élémentaires et les atomes primitifs à la constitution de molécules simples puis de molécules géantes...), et d'états toujours plus ordonnés aussi, et ce sans déroger par ailleurs au second principe de la thermodynamique et de la tendance de tout système isolé à aller vers un état simple d'équilibre et de désordre relatif..

*À l'échelle de milliards d'années, les lois de la physique permettent à l'univers de s'organiser, mais ne laissent pas prévoir la forme précise que cette organisation prendra*¹¹ - dit encore Hubert Reeves.

Conclusion.

L'irréversibilité temporelle est une évidence au quotidien. La science n'a pas à conforter des évidences apparentes. Elle a régulièrement contrecarré nos préjugés inspirés par l'expérience immédiate : le soleil est infiniment plus grand qu'il ne paraît, la terre n'est pas immobile, les corps tombent tous en réalité à la même vitesse si l'air ne les freinait, il n'y pas une mesure universelle du temps, commune à tous les observateurs potentiels de l'univers

Mais précisément l'expérience du temps n'est pas une expérience comme les autres. On sait qu'elle est humainement douloureuse : on ne peut revenir sur son passé (on ne peut revenir sur les fautes passées par exemple), on ne peut éliminer la seule chose à venir certaine, à savoir notre mort. La sagesse consiste précisément à ne pas se laisser vaincre par la fuite du temps, à savoir regarder les choses *sub specie æternitatis*. L'homme est le seul animal à se savoir mortel. Sa conscience le rend capable de le porter très loin dans le passé et très loin dans le futur. À ne pas être rivé au piquet de l'instant, comme l'animal, comme dit si bien Nietzsche dans la seconde *Considération intempestive*. À ne pas être capable d'oublier.

La science nous rend à même de poser des lois intemporelles, de définir mathématiquement des rapports constants et nécessaires entre les phénomènes, à même de projeter ainsi un idéal d'intemporalité sur une réalité temporelle fugitive. À même de regarder précisément les choses *sub specie æternitatis*. Tel est l'idéal de la science – occidentale à tout le moins - et cet idéal est défini par Platon dès ses origines. Or cet idéal est aussi un idéal religieux.

Nous nous souvenons que l'éternité ne désigne jamais qu'un éternel présent – selon toute une tradition philosophique initiée par Parménide et Platon, mais aussi selon une tradition théologique :

11 *Ibidem*, p. 134.

« Je suis celui qui suis », dit Dieu à Moïse. Il ne sera pas, Il n'a pas été, Il est. À l'opposé, nous dit Augustin, le mode d'être du temps est de ne pas être (le passé n'est plus, l'instant présent n'est déjà plus, le futur n'est pas encore). C'est que le temps n'existe pas en dehors de moi, il est une *distentio animi*, il relève d'une expérience subjective, au présent, du souvenir, de l'attention, et de l'attente. Seul est le présent, qui ne se réduit pas à l'instant passager, à savoir ce qui m'est présent à l'esprit.

Les physiciens – et ils sont nombreux - dans leurs tentatives de considérer l'irréversibilité temporelle comme seulement apparente, voire simplement subjective, donne raison à Augustin et perpétuent, sans le savoir, une vision du monde, fortement marquée par une tradition théologique. Comme dirait Nietzsche dans le fameux § 344 du *Gai Savoir* : *C'est sur une foi métaphysique que repose encore notre foi dans la science ; chercheurs de la connaissance, impies, ennemis de la métaphysique, nous empruntons encore nous-mêmes notre feu au brasier qui fut allumé par une croyance millénaire, cette foi chrétienne, qui fut aussi celle de Platon, pour qui le vrai s'identifie à Dieu*

Parce que l'esprit a la capacité de se rendre présent le passé le plus reculé et l'avenir le plus lointain (tant dans sa propre vie qu'en ce qui concerne l'univers lui-même), et d'atteindre comme une expérience – subjective - de l'éternité, il est alors tenté d'accorder une réalité à ce présent et cette éternité. Il projette en Dieu, par exemple, l'existence effective d'un Être éternellement présent, à qui serait présent déjà tout l'univers, comme le Dieu de Spinoza ou de Leibniz. Mais on peut bien croire avoir éliminé Dieu de ses représentations et cependant imaginer comme Laplace - et à la limite comme ceux qui défendent la théorie de l'univers-bloc - que tout est susceptible d'être idéalement présent à une intelligence supérieure. Il serait peut-être temps de ne plus identifier (fût-ce inconsciemment) le vrai à Dieu, d'adopter un point de vue – non pas nécessairement athée – mais rigoureusement a-théologique, et admettre une réalité effective de la temporalité de nature et de l'univers, quand le présent, et *a fortiori* l'éternel présent, n'a d'existence que pour et par l'esprit humain.

L'argument principal des physiciens tentant de nier la réalité (mondaine) du temps est le suivant L'expérience macroscopique de l'irréversibilité de processus physiques n'impliquerait pas une temporalité de processus au niveau microscopique. La temporalité au niveau macroscopique est probablement subjective, valable pour les individus humains que nous sommes en interaction avec le monde, dans un minuscule région de la terre – où le second principe de la thermodynamique agirait non de manière nécessaire mais de manière contingente. Sauf que nous sommes liés à une histoire, nous ne sommes qu'une espèce qui a émergé tardivement dans l'évolution du vivant né il y quelques trois milliards d'année sur terre, qui s'inscrit dans une évolution plus vaste de l'univers, pour laquelle le second principe de la thermodynamique, allié aux forces de gravitation, a joué un rôle essentiel dans l'expansion de l'univers et dans les histoires mouvementées propres à chaque galaxie...

Car si nous scrutons de près l'expérience et sommes sensibles justement au fait, qu'en raison de sa complexité, le réel auquel elle nous confronte résiste à une parfaite détermination mathématique, comme nous le montrent les théories du chaos, nous sommes conduits à devoir faire le deuil de l'idéal leibnizien selon lequel tout serait déjà présent dans les calculs de Dieu ou dans les données initiales de l'univers au moment du *big bang*). Le réel dit plus que ce qu'en nous en disent les lois qui permettent de le mathématiser (et qui, comme telles, nous en disent déjà beaucoup). Il y a toujours plus dans le réel que dans nos catégories permettant de le penser. C'était déjà la leçon que Kant tirait de la lecture de Hume et qui lui permettait de se démarquer de Leibniz. D'où le fait que nous nous sommes attachés à une lecture attentive de Kant, dans notre première intervention.

On peut en réalité inverser la proposition que formulait Rovelli à propos de la mécanique statistique appliquée au second principe de la thermodynamique, et qu'on peut étendre à la physique en général, car la question se pose aussi en physique quantique : et si notre déficit d'information concernait la temporalité profonde des processus, au niveau microphysique, nous rendait incapable de rendre compte de l'émergence de la temporalité au niveau macroscopique ?

Si nous sommes attachés à l'intemporalité essentielle de la nature, c'est parce que nous projetons de façon anthropomorphique la notion d'éternité, laquelle n'a de sens que pour nous dans la mesure où la notion d'éternité n'est jamais que celle d'un présent qui demeure, pour et par notre esprit, mais qu'elle saurait avoir un sens objectif à l'échelle de l'univers. Car, et c'est une extraordinaire leçon que nous pouvons en effet tirer de la théorie de la relativité : il n'y a pas de présent universel. Einstein se désolait que la notion de maintenant n'ait plus guère de sens en physique (dans sa conversation avec Carnap). Mais justement si le présent n'a pas d'autre réalité que subjective, il n'y a pas de raison que les présents ne soient pas multiples. Mais allons plus loin, l'éternel présent aussi n'a pas d'autre réalité que subjective, et là nous ne sommes plus augustiniens. En revanche, que des événements adviennent et passent, voilà qui constitue une réalité objective. Je préférerais parler de réel – car, comme on sait, l'objet est encore constitué par un sujet.

Oser dire quelque chose du réel, c'est un tant soit peu sortir de la science, et philosopher, sans spéculer métaphysiquement sur l'univers en se situant intemporellement à l'extérieur de lui. C'est de l'intérieur de l'univers que nous apparaît une dynamique temporelle irréversible, comme nous apparaît une extension de son espace. La science relève d'un désir, d'un amour, d'une passion, elle est philosophie à l'origine, selon l'étymologie bien connue du mot ; et la philosophie est fille de l'étonnement, nous dit Platon. Rien de plus étonnant que cette dynamique irréversible inventive de l'univers que nous pouvons constater, sans pour autant prétendre qu'elle poursuit une fin qui serait déjà présente à une intelligence idéale dès les origines de l'univers.