

Il peut paraître étrange d'aborder le thème du temps dans le cadre d'un cours donné dans une Faculté des Sciences à l'Université. Le sujet peut sembler trop universel et par-là banal, peut-être même vulgaire, pas « suffisamment pointu », une affaire qui ne pourrait donc être celle de spécialistes, d'universitaires. Eh bien justement, partant d'un tel sujet, sur lequel tous ont à dire, surtout lorsqu'on ne les questionne point, on peut remonter le fil du temps, ou le dérouler, donc faire l'histoire complète de la science, des sciences, des toutes les sciences, et donc poser la question de ce qu'elles sont, de leur signification, de leur portée et de leurs limites. Aider à penser sur la science est sans doute le premier objet de ce cours, et il est important de le faire au moment où l'on fait de la science. C'est ce qu'ont fait presque tous les scientifiques qui ont laissé leur nom¹ : Max Born², Bertrand Russell³, Niels Bohr⁴, Albert Einstein⁵, Louis de Broglie⁶, Erwin Schrödinger⁷, Pascual Jordan⁸, Jacques Monod⁹, François Jacob¹⁰, Ilya Prigogine¹¹, Murray Gell-Mann¹², René Thom¹³, Alain Connes¹⁴, Robert Oppenheimer¹⁵, Georges Camguilhem¹⁶. Comprendre comment les concepts ont émergé et ont été construits, toujours dans la peine, les hésitations, les controverses, voir à quels moments des choix ont été faits, tout cela est essentiel pour faire siens les savoirs développés par nos prédécesseurs, et parfois pouvoir créer soi-même, faire évoluer ou bouleverser la science. Dans une démarche historique, outre les ouvrages cités en référence dans le présent texte, on pourra se référer aux « *Éléments d'histoire des sciences* » dirigés par Michel Serres¹⁷, à l'« *Histoire des sciences et savoirs* », dirigée par Dominique Pestre¹⁸, et aussi « *Trente livres de physique qui ont changé le*

¹ La liste des auteurs cités ici n'est pas exhaustive, pas plus que celles de leurs ouvrages cités en référence

² *L'expérience et la théorie en Physique*, Gauthier-Villars, (1955), traduction d'un texte publié par Cambridge University Press, d'une conférence donnée à Newcastle upon Tyne, le 21 mai 1943 devant la Société philosophique Durham et la Société de Science pure

La responsabilité du Savant dans le monde moderne, Payot 1967, *Von der Verantwortung des Naturwissenschaftlers*

³ *L'esprit scientifique et la science dans le monde moderne*, J.-B. Janin, Editeur, Paris 1947

⁴ *Physique atomique et connaissance humaine*, Gauthier-Villars, 1972

⁵ *Conceptions scientifiques morales et sociales*, Flammarion 4^{ème} Editions, 1952

⁶ *Certitudes et incertitudes de la science*, Albin Michel, 1966

⁷ *Qu'est-ce que la vie ?* Points Sciences (1986), titre original : *What is Life ?* Cambridge University Press, 1967

L'esprit de la matière, le Seuil (1990), titre original : *Mind and Matter*, Cambridge University Press (1958)

⁸ *La physique et le secret de la vie organique*, Albin Michel, 1959, titre original : *Die Physik und das Geheimnis des organischen Lebens*

⁹ *Le hasard et la nécessité, Essai sur la philosophie naturelle de la biologie moderne*, Points Essais, 1970

¹⁰ *Le jeu des possible, Essai sur la diversité du vivant*, Fayard, 1981

¹¹ *La fin des certitudes*, Ed. Odile Jacob, 1996

¹² *Le quark et le jaguar*, Flammarion, 1997, titre original ; *The quark and the jaguar, adventures in the simple and the complexe*

¹³ *Prédire n'est pas expliquer*, avec Émile Noël, Flammarion, Paris, 1993

Paraboles et catastrophes, Flammarion, Paris, 1983

¹⁴ « *Le théâtre quantique* », avec Danye Chéreau, Jacques Dixmier, Essai - Odile Jacob - mai 2013

¹⁵ *La Science et le bon sens*, Paris, Gallimard, coll. « NRF Idées », 1972

¹⁶ *Claude Bernard, Études d'histoire et de philosophie des sciences* (1968) 7^e rééd. Vrin (Paris), 1990

¹⁷ *Éléments d'histoire des sciences*, dirigés par Michel Serres, Bordas, Paris 1989

¹⁸ *Histoire des sciences et savoirs* », dirigée par Dominique Pestre, en 3 volumes : 1. De la renaissance aux lumières, 2. Modernité et globalisation, 3. Le siècle des technosciences, Editions du Seuil, octobre 2015

monde »¹⁹, ainsi que « *Les idées qui ont changé notre monde* » de Peter Moore²⁰, et bien sûr « *les plus grands textes de physique et d'astronomie* » rassemblés et commentés par Stephen Hawking sous les titres « *Sur les épaules des géants* »²¹.

Appréhender le temps nécessite un effort et une ouverture à la multiplicité des chemins d'exploration, des cultures et des images. Cela requiert un *travail* au sens où l'ont un jour défini Michel Foucault, Jean-Claude Milner, Paul Veyne et François Wahl :

« *Travail : ce qui est susceptible d'introduire une différence significative dans le champ du savoir, au prix d'une certaine peine..., et avec l'éventuelle récompense d'un certain plaisir, c'est-à-dire d'un accès à une autre figure de la vérité*²² ».

On découvrira tout au long de ce cours à quel point un sujet si complexe que le *Temps* nécessite pour être appréhendé au mieux de rassembler les productions de l'esprit provenant de tous les champs de l'activité humaine. Bien sûr les sciences seront sollicitées en premier lieu, parce que leur dessein est de donner une description quantifiée, logique et cohérente de notre univers et de ce que nous baptisons « Réalité ». Mais il ne faut pas perdre de vue la limite de ce que nous désignons ainsi : « *la réalité n'existe pas en tant que concept indépendant de son image ou de la théorie qui la représente* »²³. Que nous dit la science sur un tel concept ? Elle donne de l'univers une description que l'on qualifie de réalisme modèle-dépendant. Dans cette approche, nous disent Hawking et Mlodinow, « *toute théorie physique ou toute image du monde consiste en un modèle (en générale un formalisme mathématique) et un ensemble de lois qui relie les éléments du modèle aux observations* »²⁴.

¹⁹ *Trente livres de physique qui ont changé le monde*, J.-J. Samuëli & J.-C. Boudenot, Ellipses édition, 2007

²⁰ *Les idées qui ont changé notre monde*, Peter Moore, Acropole, septembre 2003

²¹ *Sur les épaules des géants : les plus grands textes de physique et d'astronomie*, réunis et commentés par Stephen Hawking, Dunod 2003

²² Au sujet de la Collections « Des Travaux » aux éditions Seuil, par les quatre directeurs, Michel Foucault, Jean-Claude Milner, Paul Veyne et François Wahl

²³ In « *Y a-t-il un grand architecte dans l'Univers ?* », Stephen Hawking & Léonard Mlodinow, Ed. Odile Jacob, poches-Sciences, p 52-53 (2014).

²⁴ *Loc. cit.*

Table des matières

A. Appréhender le temps : monter sur les épaules des géants	page 9
B. Histoire du temps en physique	page 15
I. Préambule à l’histoire de la compréhension du temps par les sciences : de l’antiquité à Galilée	page 17
II. La mécanique	page 25
III. L’énergie et l’ère industrielle	page 32
IV. La synthèse de Boltzmann	page 41
V. La thermodynamique du non équilibre	page 45
VI . Ordre par fluctuations	page 74
VII. Histoire du développement des connaissances sur la lumière	page 76
VIII. Les deux grandes révolutions scientifiques du XXème siècle :	page 91
i. La relativité	page 92
ii. La physique quantique	page 105
Complément 2 : <i>Lecture</i>	page 130
Complément 3 : <i>La notion d’entropie</i>	page 131
Complément 4 : <i>L’expérience des muons</i>	page 134
Complément 5 : <i>Paradoxe d’Achille et de la tortue</i>	page 136
Complément 6 : <i>La vérité ?</i>	page 139
C. Le temps : introduction par les arts	page 145

On ne peut aborder le thème du temps, celui qui passe, dit-on, sans penser au magnifique petit ouvrage de Charles Percy Snow, intitulé « Les deux cultures », texte d'une conférence qu'il a prononcée le 7 mai 1959 à la Chambre de sénat de l'Université de Cambridge et qui eut un retentissement immense dans le monde anglo-saxon (publié par Cambridge University Press en 1959 dans sa version originale et en 1963 pour sa deuxième édition, puis en 1968 par Jean-Jacques Pauvert dans la Collection *Libertés nouvelles*²⁵, pour la version française). Dans ce texte Snow imagine l'émergence d'une troisième culture issue de la culture traditionnelle, littéraire et de la culture scientifique. Cette troisième culture devait faire le lien entre les deux premières entre lesquelles un fossé inexorable était creusé par le développement des connaissances qui ne cessait de s'accélérer.

Des nains sur des épaules de géants

*(nani gigantum humeris insidentes)*²⁶

« Les mots servent à libérer une matière silencieuse
qui est bien plus vaste que les mots eux-mêmes »

Nathalie Sarraute

²⁵ Cette collection avait pour principe : « *la littérature de combat de tous les temps et de toutes les tendances* »

²⁶ Cette métaphore est attribuée à Bernard de Chartres, maître du XI^e siècle. Elle est utilisée pour montrer l'importance pour tout homme ayant une ambition intellectuelle de s'appuyer sur les travaux des grands penseurs du passé (les « géants »). Citée par Jean de Salisbury dans son *Metalogicon*, elle est également utilisée au fil des siècles par divers scientifiques, comme Isaac Newton ou Blaise Pascal.

« Les gens qui ne comprennent rien à l'art ni à la science croient que ce sont là deux choses immensément différentes, dont ils ignorent tout. Ils s'imaginent rendre un service à la science en lui permettant d'être sans imagination, et ils croient faire progresser l'art en empêchant quiconque d'en attendre de l'intelligence. Il se peut que tel homme ait un don particulier pour une discipline particulière, mais il n'est pas d'autant plus doué dans cette discipline qu'il est plus incapable dans toutes les autres. Même si l'humanité a dû souvent et longtemps se passer du savoir comme de l'art, il reste que l'un et l'autre sont essentiels à ce que nous considérons être « l'humain ». Il n'existe personne qui soit totalement dépourvu de savoir, et il n'existe personne qui soit totalement dépourvu d'art. »

Berthold Brecht

L'Achat du cuivre (1945)

Le temps (au sens du temps qui passe) est l'objet central de cette unité d'enseignement. On interroge ici un large champ d'activités humaines (sciences exactes, naturelles, humaines, sociales, arts) qui ont à dire sur le concept de temps.

Ce document rassemble des extraits d'un cours donné à l'Université d'Orléans. Celui-ci traite principalement de ce que la science dit sur le temps, mais aborde aussi, par des illustrations diverses, ce qu'en disent les arts. Il est ouvert par des citations de scientifiques, philosophes, essayistes, romanciers, artistes de toutes les époques sur le thème du temps. On y découvre ainsi que si le temps est d'autant plus insaisissable qu'on veut l'appréhender plus précisément, il n'en est pas moins approchable de façon pertinente par tous les moyens et outils intellectuels ou techniques dont on peut se doter. Le contenu des leçons données est le suivant.

On verra que le temps est un concept qui ne se laisse approcher que très difficilement et toujours de façon indirecte. Aucune étude scientifique ne porte directement sur le temps à proprement parler. L'histoire des sciences montre que, de Galilée à Prigogine, les travaux des scientifiques contiennent chacun un regard spécifique sur le temps. Ces différentes compréhensions de ce qu'est le temps, ne sont pas toutes compatibles entre elles. Elles mettent en évidence des approches du monde parfois contradictoires mais cependant individuellement convaincantes. Le temps peut y apparaître comme réversible, irréversible, continu, bifurquant ou multiple, certains même démontrent que « *le temps n'existe pas* ». C'est la complexité du monde qui nous est ainsi révélée.

En rappelant que « *les seuls concepts véritablement scientifiques sont ceux liés à la géométrie de l'espace-temps* », René Thom nous renvoie à un temps du passage d'un espace à un autre et de là, à d'autres horizons comme celui du temps des rites, et aussi aux rites de passages.

Plus proche de la réalité immédiate la musique, qui à sa façon rythme le temps, n'existe que par la manifestation d'une mémoire complexe qui fait osciller la conscience en micro fluctuations temporelles, donne comme une épaisseur au présent et à l'écoulement du temps une sorte de viscosité.

On verra avec Ilya Prigogine et Isabelle Stengers que « *le temps aujourd'hui retrouvé, c'est aussi le temps qui ne parle plus de solitude, mais de l'alliance de l'homme avec la nature qu'il décrit* ».

On étudiera en quoi les dialogues directs ou indirects entre Albert Einstein et Henri Bergson, ou René Thom et Ilya Prigogine et Isabelle Stengers montrent l'enchevêtrement des visions objectives et subjectives où l'expression artistique est aussi sollicitée.

Le problème du temps et de la représentation du mouvement dans les arts est illustré avec la même difficulté, la même ambiguïté. C'est « le triomphe de la mort » de Bruegel, « le reflet du temps » de Magritte ou « l'homme en marche » de Rodin ou de Giacometti.

La quête du temps se révèle sans fin. Au mieux on l'approche sans jamais l'atteindre, mais dans cette quête inlassable sur un sujet qui l'étreint et le renvoie à sa propre finitude, l'homme est comme face à une quête du Graal.

« Au même titre que l'espace, disait Kant, le temps constitue la forme *a priori* de notre sensibilité. Autrement dit, le temps est l'horizon à travers lequel nous autres humains faisons l'expérience du monde. Il s'impose comme la condition d'une existence digne de ce nom, il structure notre façon d'aller à la rencontre de ce qui est ».

Jean Birnbaum

Où est passé le temps ?

Foliot essais, Éditions Gallimard, 2012

A. Appréhender le temps : monter sur les épaules des géants

« Le temps lui-même n'a pas d'existence en tant que tel. Ce sont les choses, et leur écoulement, qui rendent sensibles le passé, le présent, l'avenir ».

Lucrece (98-55 av. JC)
De Rerum Natura

« Qu'est-ce que le temps ? Si personne ne me le demande, je le sais. Mais si on me le demande et que je veuille l'expliquer, je ne le sais plus ».

Saint Augustin (354-430)
Les Confessions.

« Si on ne me demande rien, et si je suis laissé à la spontanéité de mon intuition, rien n'obscurcit l'évidence de la temporalité ; mais si on m'interroge sur la nature du temps, je me trouble et cesse de savoir ; tout devient ambigu ».

Vladimir Jankélévitch (1903-1985)
Quelque part dans l'inachevé.

« Dans mon début est ma fin [...] Je suis ici ou là, ou ailleurs. Dans mon début. [...] Ce que nous appelons le début est souvent la fin. [...] La fin est l'endroit d'où nous partons ».

Thomas Stearns Eliot (1888-1965)
Four Quartets.

Dans le mouvement des vagues de la mer s'avance autre chose que la mer.
A quel appel répond la marée qui monte ? A quel appel répond le trajet du soleil dans la nuit et le jour ? A quel appel l'épidémie ? A quel appel le fruit qui tombe ? L'automne ? Le printemps, le *primum tempus* ? »

Pascal Quignard (1948-)
Rhétorique spéculative.

« Chaque année, un jour de printemps, en pénétrant dans le jardin, je ressens le même choc, la même stupéfaction.
Chaque année, c'est le même émerveillement devant les bourgeons qui éclatent et commencent à éclore ; devant les débuts de feuilles, cette dentelle verte qui décore les branches et tremble sous la brise.

Une fois encore, les jours vont s'allonger ; la lumière et la chaleur revenir. Les feuilles se former, puis les fleurs et les graines. Animaux et végétaux vont exploser de vie et de croissance.

Indifférente aux affaires des hommes, la grande machine de l'univers continue de tourner, inexorable.

Plus que l'océan et les tempêtes, plus que la montagne et ses glaciers, plus que la voûte céleste et ses galaxies, c'est ce petit frisson vert, qui parcourt les arbres et vous surprend un matin de printemps, qui me donne, avec la force de l'évidence, l'impression d'assister au spectacle grandiose qui, depuis quelque douze milliards d'années, agite la grande scène de l'univers. »

François Jacob (1920-2013)

Prix Nobel de Physiologie ou Médecine

La souris, la mouche et l'homme.

« Le temps est la substance dont je suis fait. Le temps est un fleuve qui m'emporte, mais je suis le fleuve. C'est un tigre qui me dévore, mais je suis le tigre. C'est un feu qui me consume, mais je suis le feu ».

Jorge Luis Borges (1899-1986)

Une nouvelle réfutation du temps.

« Nous passons notre vie à renverser les heures. Nous inventons le temps ».

Paul Eluard (1895-1952)

Poésie ininterrompue.

« Qu'est-ce que le temps ? Comment donc ces deux temps, le passé et l'avenir, sont-ils, puisque le passé n'est plus et que l'avenir n'est pas encore ? Quant au présent, s'il était toujours présent, s'il n'allait pas rejoindre le passé, il ne serait pas du temps, il serait de l'éternité »

Saint Augustin (354-430)

Les Confessions. Livre XI.

« Au mot présent, il faut préférer le mot plus sûr de passant. Le présent est le passant du temps. [...] Il est possible que dans le passant du temps, le passé soit l'énergie. Comme le mot courant dit quelque chose de plus profond que toute l'eau du fleuve. [...] Nous ne connaissons jamais ce qui commence à son début. [...] Nous avons vécu avant de naître. Nous avons connu la vie avant que le soleil n'éblouisse nos yeux. [...] « Han Yu naquit en 768. [...] Un jour il déploya les cinq doigts de sa main. Il dit énigmatiquement qu'il avait encore entre chacun de ses doigts *l'ombre de la première aube*. [...] Retrouver l'aube partout, partout, partout, c'est une façon de vivre. Reconstituer la naissance dans tout automne ; héler la perdue dans l'introuvable ; faire resurgir l'autre incessant et imprévisible dans l'irruption de la première fois car il n'en est pas d'autres. Naître ».

Pascal Quignard (1948-)

Les ombres errantes.

« Et pendant que cette planète continuait à tourner selon la loi fixe de la gravitation, à partir d'un début si simple, une infinité de formes les plus belles et les plus merveilleuses ont évolué, et continuent d'évoluer ».

Charles Darwin (1809-1882)

De l'origine des espèces.

« La prise en compte simultanée de toutes ces causes de mouvement et la caractérisation de ces mouvements par des lois exactes permettant des calculs faciles excède, si je ne me trompe pas, la puissance de n'importe quel esprit humain ».

Isaac Newton (1643-1727)

(Cité dans Gregory Laughlin,

"The solar system's extended shelf life",

Nature, 459 : 781-2, 2009.)

« Mais lors même que les lois naturelles n'auraient plus de secret pour nous, nous ne pourrions connaître la situation 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 ».

Henri Poincaré (1854-1912)

Calcul des probabilités. (Cité dans Hubert Krivine,

La Terre, des mythes au savoir.)

« Prédicibilité : est-ce que le battement des ailes d'un papillon au Brésil peut provoquer une tornade au Texas ? »

Edward Lorenz (1917-2008)

Communication au congrès annuel de

l'American Association for the Advancement of Sciences,

29 décembre 1972.

« Le chaos a eu un rôle déterminant dans la formation et l'évolution de notre système solaire, sculptant une grande part de son architecture visible aujourd'hui. Un corollaire du chaos est que le système solaire actuel est continuellement en train de changer ».

Joseph Burns (1941-)

"The four hundred years of planetary science since

« Et ainsi les découvertes des lauréats du prix Nobel de physique 2011 ont contribué à nous révéler [que notre] Univers est inconnu à 95% à la science. Et, de nouveau, tout redevient possible ».

Communiqué de l'Académie Royale de Suède,
"Le prix Nobel de physique 2011. Ecrit dans les étoiles."

« Et que prouve donc ton cœur ? Entre hier et demain il oscille sans bruit, étranger et sonne en battant, sa chute hors du temps ».

Ingeborg Bachmann (1926-1973)
Tombe, cœur.

« Le présent est fait de déformations du passé et d'ébauches imprécises de l'avenir ».

Pierre Reverdy (1889-1960)
Le livre de mon bord.

« L'avenir nous tourmente, le passé nous retient, c'est pour ça que le présent nous échappe ».

Gustave Flaubert (1821-1880)
Lettre à Louise Colet.

« Nous errons dans des temps qui ne sont pas [les] nôtres ».

Blaise Pascal (1623-1662)
Pensées.

« Je suis ici
Ou là, ou ailleurs. [...]
Temps passé et Temps futur
Permettent à peine d'être conscient.
Etre conscient, ce n'est pas être inscrit dans le temps
Et pourtant c'est seulement à l'intérieur du temps que le moment dans le jardin des roses
Que le moment sous la tonnelle où battait la pluie
Que le moment dans l'église où soufflait le vent et où retombait la fumée
Peuvent être remémorés ; enchevêtrés dans le passé et le futur.
C'est seulement à travers le temps que peut être conquis le temps. »

Thomas Stearns Eliot (1888-1965)
Four Quartets.

« Un homme qui dort tient en cercle autour de lui le fil des heures, l'ordre des années et des mondes. Il les consulte d'instinct en s'éveillant et y lit en une seconde le point de la terre qu'il occupe, le temps qui s'est écoulé jusqu'à son réveil. [...] Mais il suffisait que, dans mon lit même, mon sommeil fût profond et détendit entièrement mon esprit ; alors celui-ci lâchait le plan du lieu où je m'étais endormi, et quand je m'éveillais au milieu de la nuit, comme j'ignorais où je me trouvais, je ne savais même pas au premier instant qui j'étais ; j'avais seulement dans sa simplicité première, le sentiment de l'existence comme il peut frémir au fond d'un animal ; [...] mais alors le souvenir – non encore du lieu où j'étais, mais de quelques-uns de ceux que j'avais habités et où j'aurais pu être – venait à moi comme un secours d'en haut pour me tirer du néant d'où je n'aurais pu sortir tout seul ; je passais en une seconde par-dessus des siècles de civilisation, et l'image confusément entrevue de lampes à pétrole puis de chemises à col rabattu recomposaient peu à peu les traits originaux de mon moi. »

Marcel Proust (1871-1922)

A la recherche du temps perdu

« Nous avons vécu l'expérience mais nous n'avons pas saisi la signification,
Et l'approche de la signification nous restitue l'expérience
Sous une forme différente [...] Essayant de délier, de dérouler, de démêler
Et de réassembler le passé et le futur. »

Thomas Stearns Eliot (1888-1965)

Four Quartets

« La théorie d'Einstein nous dit que le fameux « passage du temps », source de mélancolie pour tant de poètes, est une illusion que nous devons sans doute au caractère irréversible de notre mise en mémoire. [...] L'ensemble des lignes d'espace-temps représentant la structure et l'évolution du système nerveux humain offre, du fait de l'absence d'équilibre thermodynamique et de l'accumulation d'informations, une dissymétrie entre le « bas » (de l'espace-temps) et le « haut ». Cette dissymétrie serait la racine de la sensation illusoire d'un écoulement temporel. »

Thibault Damour (1951-)

Entretiens sur la multitude du monde

« Le temps est un grand professeur, malheureusement il tue ses élèves. »

Hector Berlioz (1803-1869)

« Je suis un cerf-volant »

André Gides (1869-1951)

« La nostalgie dégage le charme des moments qui n'en ont pas ».

Vladimir Jankélévitch (1903-1985)

« Il vient un temps où toutes les cendres sont mêlées. Alors, que m'importera d'avoir été Voltaire ou Diderot, ou que ce soient vos trois syllabes ou les trois miennes qui restent ? Il faut travailler et être utile. »

Lettre de Diderot à Voltaire

19 février 1758.

« Tous les êtres circulent les uns dans les autres. Tout est en un flux perpétuel. Tout animal est plus ou moins homme ; tout minéral est plus ou moins plante ; toute plante est plus ou moins animale. Il n'y a qu'un seul individu, c'est le tout. Naître, vivre et passer, c'est changer de forme. »

Denis Diderot (1713-1784)

Le rêve de d'Alembert

Ecrit en 1769.

« L'univers en physique quantique n'a pas un passé ou une histoire unique »

Stephen Hawking & Léonard Mlodinow

In « Y a-t-il un grand architecte dans l'Univers ? »

« C'est l'effervescence quantique qui génère le passage du temps et non l'inverse...L'aléa quantique est le tic-tac de l'horloge divine »

Connes Alain, Danye Chéreau & Jacques Dixmier,

Le théâtre quantique, l'horloge des anges ici-bas, 2013

« Les horloges ne mesurent pas le temps. Sinon, elles resteraient synchronisées. Elles mesurent la durée d'une histoire qui leur arrive »

Marc Lachièze-Rey

« En dehors de moi, dans l'espace, il n'y a jamais qu'une position unique de l'aiguille et du pendule, car des positions passées il ne reste rien. Au dedans de moi, un processus d'organisation ou de pénétration mutuelle des faits de conscience se poursuit, qui constitue la durée vraie. »

Henri Bergson (1859-1941)

Essai sur les données immédiates de la conscience (1889)

B. Histoire du temps en physique

Le temps est un concept que ne se laisse approcher que très difficilement et toujours de façon indirecte. Aucune étude scientifique ne porte à proprement parler directement sur le temps. Les différentes théories physiques qui se sont développées successivement au fur et à mesure que notre compréhension du monde avançait, proposent chacune une vision spécifique du temps. Ces visions du temps, qui ne sont pas toutes compatibles entre elles, révèlent des visions de l'univers bien différentes les unes des autres et toujours plus pour beaucoup d'entre elles très éloignées du sens commun.

D'une façon générale, le temps apparaît dans ces théories dans la description des évolutions des systèmes étudiés. C'est la nature **des états** dits « **attracteurs** », vers lesquels évoluent les systèmes, qui traduit une certaine conception du temps, notamment dans une relation entre **cause et effet**, et le définit analytiquement. Ainsi : En *mécanique classique* les états attracteurs sont les trajectoires ; celles-ci définissent un temps qui s'écoule **continûment et réversiblement**.

En *thermodynamique de l'équilibre* les états attracteurs sont les états d'entropie maximum et les évolutions se font par dégradation **irréversible** de l'énergie.

En *thermodynamique du non équilibre*, ou thermodynamique des processus irréversibles, **le temps est non seulement irréversible, mais aussi bifurquant et multiple**.

La *physique statistique* définit les états attracteurs des systèmes constitués de nombreuses particules, comme ceux pour lesquels le désordre est maximum. Le désordre est associé à l'entropie et le temps associé aux particules est celui de la *mécanique classique* (**réversible**), alors qu'au niveau des systèmes, constitués d'un grand nombre de particules, il est bien sûr **irréversible**.

En *relativité* le temps est **réversible** et **continu** mais **multiple** car, relatif il ne s'écoule pas de la même façon dans deux repères en mouvement relatif l'un par rapport à l'autre.

En *mécanique quantique* le temps a les mêmes caractéristiques qu'en *mécanique classique*, à ceci près qu'il est touché par le principe de « **limitation des concepts** ».

« Pour obtenir même une solution partielle l'homme de science doit rassembler les faits chaotiques qui lui sont accessibles et les rendre cohérents et intelligibles par la pensée créatrice ...

Des techniques d'investigation, des méthodes systématiques pour trouver et suivre les fils conducteurs du grand roman à mystères, que constitue le livre de la nature, ont été développées. Quelques-unes des énigmes de la nature ont été résolues, bien que beaucoup de solutions se soient trouvées, à la lumière des recherches ultérieures, être provisoires et superficielles».

Albert Einstein et Léopold Infeld²⁷

Selon Whitehead l'intelligibilité de la nature consiste à :

« ...former un système d'idées générales qui soit nécessaire, logique, cohérent, et en fonction duquel tous les éléments de notre expérience puissent être interprétés »

Alfred North Whitehead²⁸

²⁷ L'évolution des idées en physique, traduit de l'anglais par Maurice Solovine

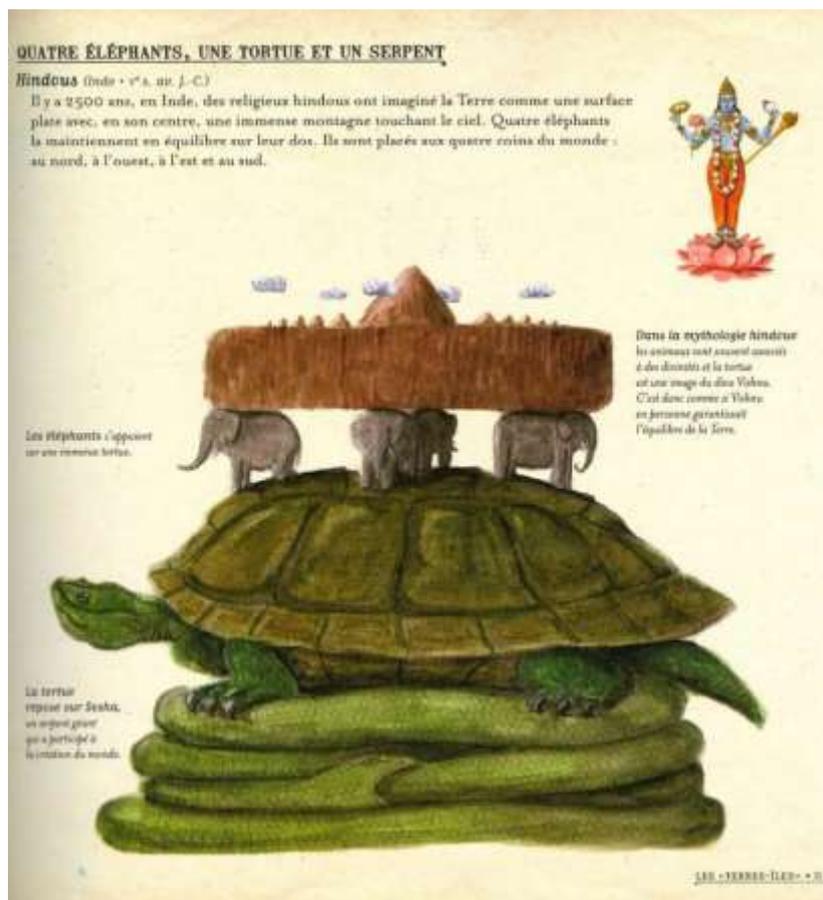
²⁸ Procès et réalité, Paris, Gallimard, 1995 ; version originale : *Process and Reality: An Essay in Cosmology*, New York, Macmillan Company, 1929

I. Préambule à l'histoire de la compréhension du temps par les sciences : de l'antiquité à Galilée

Les arabes, grecs

L'espace et le temps sont les termes en lesquels l'homme pense et appréhende l'univers. Ils ont toujours été indissociablement liés.

Depuis le début de l'histoire des hommes on pensait que l'espace était structuré en haut et bas : en haut le ciel, en bas la Terre. Le mouvement spontané des choses était la chute vers le bas, la chute vers la Terre. Quant à la Terre elle-même, elle ne tombait pas puisque posée sur une tortue, des éléphants, des colonnes, eux-mêmes posés sur ... sauf chez les grecs.



Anaximandre de Milet (610 av. J.-C. : 546 av. J.-C., [Milet, Turquie](#))

Il donne une vision du monde dans laquelle les étoiles et le Soleil tournent autour de la Terre. Ces objets disparaissent le soir à l'Ouest et réapparaissent le matin à l'Est, donc il y a un espace « derrière » où ils peuvent passer. Il s'ensuit que la Terre flotte dans l'espace.

Malgré ces observations et les déductions logiques qu'il en tire, Anaximandre ne parvient pas à imposer son idée car la notion d'espace vide est à l'époque inconcevable. Les objets se déplacent de proche en proche en prenant la place les uns des autres dans un mouvement circulaire (Platon). Seul Démocrite et les atomistes sont en accord avec cette idée d'espace vide dans lequel se déplacent les atomes.

Platon (en [grec ancien](#) Πλάτων / *Plátôn*, né à Athènes en -428/-427, mort en -348/-347 dans cette même cité)

Pour lui il n'y a pas d'espace. Le temps est l'image mobile de l'éternité

Le Timée

Aristote (-384 Stagire, Aristotélis, Grèce ; -322 Chalcis, Grèce)

Le temps est réduit au mouvement. Le temps n'existe que dans la succession des phénomènes. Aristote associe le temps à sa mesure.

« Le temps est le nombre du mouvement selon l'antérieur et le postérieur ».

La Physique, Chapitre 4

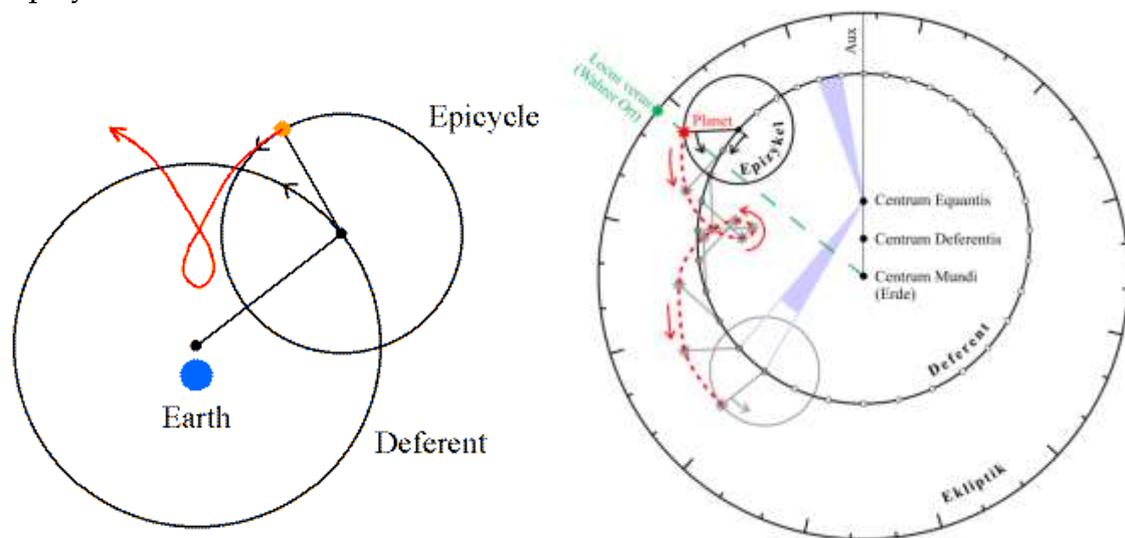
Il reste vrai qu'on ne peut appréhender le temps en lui-même. On ne le perçoit qu'à travers les phénomènes qui se succèdent. On le mesure grâce au déplacement de l'aiguille sur l'horloge. S'il n'y a plus d'« horloge », il n'y a plus de temps.

Le temps est ainsi en quelque sorte réduit au mouvement. On ne peut alors pas répondre à la question fondamentale chez Augustin : où se situe le temps ?*

Il faut attendre Galilée pour apprendre que le mouvement n'a de sens que relativement, l'absence de mouvement ou le mouvement rectiligne et uniforme n'a pas d'existence en lui-même.

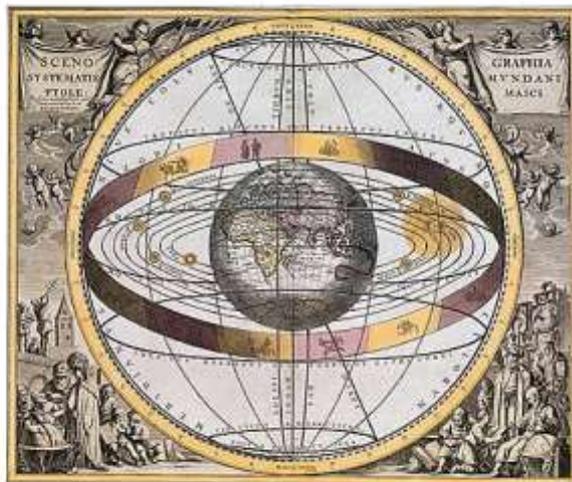
Voir aussi Parménide

Claude Ptolémée : Ptolémaïs de Thébaïde (Haute-Égypte), né vers 100 - mort vers 168 à Canope
Les épicycles de Ptolémée



Les épicycles de Ptolémée

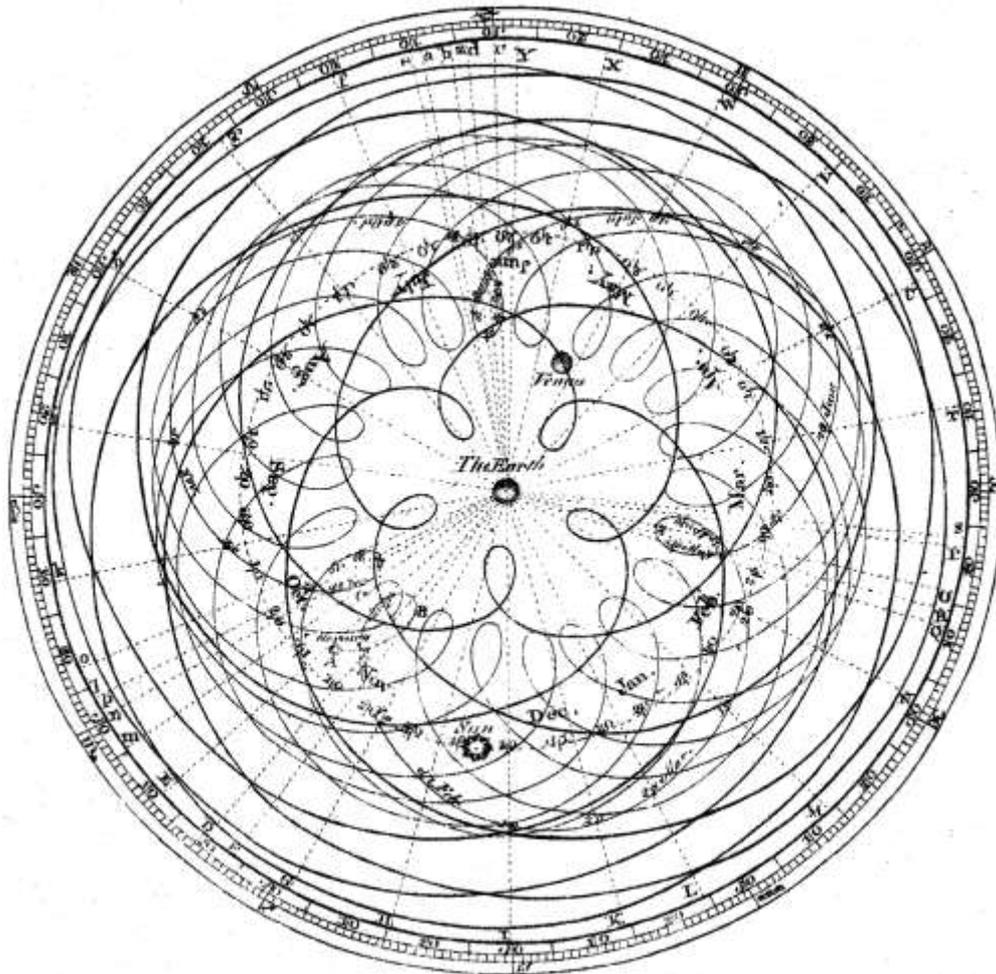
Système de Ptolémée



Le système de Ptolémée. Gravure du XVII^e siècle. (Bibliothèque nationale de France, Paris.)

Hipparque (2^{ème} siècle avant Jésus Christ)

Il décrit le mouvement des planètes avec une grande précision (un pour mille) grâce aux épicycles de Ptolémée



*La complexité des mouvements des planètes dans le modèle géocentrique:
Epicycles selon Hipparque*

Les paradoxes de Zénon (rapportés par [Aristote](#) dans la *Physique* et par [Simplicios de Cilicie](#) dans un commentaire à ce sujet) et la difficulté de rapporter au continu le temps dénombrable en instants sont des éléments essentiels attestant de la volonté de construire un temps objectif. Ici se dégage même comme l'idée d'un temps quantifié.

Achille et la tortue

Article détaillé : [Paradoxe d'Achille et de la tortue](#) (cet article est reproduit en complément 4 du présent document).

Dans le paradoxe d'Achille et de la tortue, il est dit qu'un jour, le héros grec [Achille](#) a disputé une course à pied avec le lent reptile. Comme Achille était réputé être un coureur très rapide, il avait accordé gracieusement à la tortue une avance de cent mètres. Zénon affirme alors que le rapide Achille n'a jamais pu rattraper la tortue. « En effet, supposons pour simplifier le raisonnement que chaque concurrent court à vitesse constante, l'un très

rapidement, et l'autre très lentement ; au bout d'un certain [temps](#), Achille aura comblé ses cent mètres de retard et atteint le point de départ de la tortue ; mais pendant ce temps, la tortue aura parcouru une certaine distance, certes beaucoup plus courte, mais non nulle, disons un mètre. Cela demandera alors à Achille un temps supplémentaire pour parcourir cette distance, pendant lequel la tortue avancera encore plus loin ; et puis une autre durée avant d'atteindre ce troisième point, alors que la tortue aura encore progressé. Ainsi, toutes les fois où Achille atteint l'endroit où la tortue se trouvait, elle se retrouve encore plus loin. Par conséquent, le rapide Achille n'a jamais pu et ne pourra jamais rattraper la tortue ». « Depuis le V^e siècle avant J.-C., écrivent Philippe Boulanger et Alain Cohen dans *Le Trésor des Paradoxes* (Éd. Belin, 2007), ce paradoxe du mouvement a stimulé les réflexions des mathématiciens, entre autres Galilée, [Cauchy](#), [Cantor](#), Carroll et Russell ». Pour [Bergson](#), « Les philosophes l'ont réfuté de bien des manières et si différentes que chacune de ces réfutations enlève aux autres le droit de se croire définitive ».

En analyse moderne, le paradoxe est résolu en utilisant fondamentalement le fait qu'une série infinie de nombres strictement positifs peut converger vers un résultat fini. Cette résolution est purement théorique et repose sur l'acceptation de l'infini. Car la série converge mais sur une somme infinie, ou un nombre d'itération infini. Or l'infini est un outil mathématique pour permettre le calcul et n'existe pas physiquement. L'erreur de raisonnement est donc posée lors de l'énoncé, discrétiser un mouvement continu peut permettre des erreurs de raisonnement. C'est la continuité qui permet à la pierre de toucher son arbre, discrétiser le mouvement continu donne l'impression que la pierre ne touchera jamais son arbre puisqu'étant continu il est forcément indéfiniment divisible... Le corps \mathbb{Q} est dense dans le corps \mathbb{R} et entre 2 rationnels, il existe toujours un rationnel...

Le paradoxe de la flèche

Une flèche lancée est toujours immobile : en effet, tout corps est soit en mouvement soit en repos quand il se trouve dans un espace égal à son volume ; or la flèche se trouve à chaque instant dans un espace égal à son volume.

Imaginons une [flèche](#) en vol. À chaque instant, la flèche se trouve à une position précise. Si l'instant est trop court, alors la flèche n'a pas le temps de se déplacer et reste au repos pendant cet instant. Maintenant, pendant les instants suivants, elle va rester immobile pour la même raison. La flèche est toujours immobile et ne peut pas se déplacer : le mouvement est impossible.



Ce [paradoxe](#) traduit toute la difficulté conceptuelle liée à la notion de [vitesse instantanée](#). Toute vitesse nécessite d'associer un déplacement à un intervalle de temps. Si cet intervalle de temps est nul, il ne peut y avoir de déplacement, ce qui rend apparemment impossible le calcul d'une vitesse.

Au delà de sa signification mathématique, ce paradoxe renferme de profondes interrogations [physiques](#) et [métaphysiques](#) sur la nature du [mouvement](#). La physique classique, et en particulier la [mécanique analytique](#), a répondu à ces interrogations en introduisant le concept de [quantité de mouvement et invariance par translation dans l'espace](#), affranchie de la position et du temps. Il est intéressant de remarquer qu'avec la [mécanique quantique](#), le paradoxe de la flèche a retrouvé une certaine pertinence suivant le [principe d'incertitude](#) ou l'impossibilité de connaître simultanément la [position](#) et la [vitesse](#) d'une [particule](#).

Par ailleurs, les [unités de Planck](#) permettent de contourner le paradoxe en évitant les [infinis](#), en sorte de permettre la [mesure](#) de la [quantité de mouvement](#). En effet, la [mécanique lagrangienne](#) sous-jacente imposait arbitrairement un [principe de moindre action](#) pour justifier la stabilité de la relation entre l'[énergie](#), l'[espace](#) et le [temps](#). Le principe de moindre action utilise l'hypothèse de deux points fixes sur le parcours du mobile : un point de départ, mais aussi un point d'arrivée. Cela a souvent été critiqué comme étant l'utilisation dans le raisonnement d'une [cause finale](#), ce qui est contraire à la [causalité](#) qui suit la [flèche du temps](#) en physique. En fait, si le point de départ est doté de conditions initiales (coordonnées et vitesse), le point d'arrivée n'a pas de coordonnées précises ni de vitesse imposée : il existe, c'est tout. L'attribution arbitraire du point final dans le raisonnement permet d'émettre l'hypothèse de l'existence d'un [trajet](#) à partir de l'état initial et de déterminer ses conditions ([équations d'Euler-Lagrange](#)).

Une formulation rigoureuse du paradoxe enfin a d'ailleurs été appelée [effet quantique de Zénon \(en\)](#), qui s'applique à une [observable](#) quantique quelconque, et qui consiste à dire que lorsqu'on effectue N mesures de cette observable dans un intervalle de temps t, la probabilité de trouver un système dans le même état après cet intervalle de temps, tend vers 1 lorsque N tend vers l'infini.

Saint-Augustin

ou Augustin d'Hippone (latin : Aurelius Augustinus),
né dans le municipe de Thagaste (actuelle Souk Ahras,
Algérie) le 13 novembre 354 et mort le 28 août 430 à
Hippone (actuelle Annaba, Algérie):

Les 3 temps : il n'y a pas de passé, pas de futur, mais il y a un présent passé dont on se souvient, un présent « présent » de l'action, le présent futur en attente.

« Si rien ne passait il n'y aurait pas de passé, si rien n'advenait il n'y aurait pas de futur, si rien n'était il n'y aurait pas de présent, mais ces deux temps, le passé et le futur, comment peut-on dire qu'ils sont puisque le passé n'est plus et que le futur n'est pas encore ? Quant au présent, s'il restait toujours présent sans se transformer en passé, il cesserait d'être « temps » pour être « éternité ». Si donc le présent pour être temps, doit se transformer en passé, comment pouvons-nous dire qu'il est, puisque son unique raison d'être c'est de ne plus être ? Si bien que en fait nous ne pouvons parler de l'être du temps que parce qu'il s'achemine vers le non être »²⁹.

Cette interrogation de Saint-Augustin lui vient de son interrogation sur Dieu et sur « qu'est-ce que faisait Dieu avant la création » ? D'où ensuite : quel est le sens de « avant » et « après » pour Dieu ? Augustin dira qu'il n'y a aucun sens à l'avant et à l'après pour Dieu, et il distingue ainsi le temps et l'éternité.

Selon Aristote le temps est en quelque sorte réduit au mouvement. On ne peut alors pas répondre à la question : où se situe le temps, question fondamentale chez Augustin. Où se situe Dieu et où se situe le temps ? Est-ce à l'intérieur de moi ? Est-ce la conscience que j'ai du temps qui détermine le temps ou bien est-ce à l'extérieur de moi, une forme de translation de mouvement des objets du monde extérieur qui fait l'essence même du temps ? Lorsque Aristote dit « Le temps est le nombre du mouvement selon l'antérieur et le postérieur », ce n'est pas le temps qui est saisi, mais sa mesure. Ce qui est quelque chose d'autre chose. Il s'agit de quelque chose qui passe selon une répétition d'une certaine unité de durée. Mais cela n'est pas l'être du temps. Ce n'est rien d'autre que la manière avec laquelle l'observateur tente d'organiser le

²⁹ Livre 11 des Confessions

changement pour lui donner un sens, mais cela ne suffit pas pour saisir le temps en tant que tel. Le temps des montres est un temps utile qui permet d'organiser la vie sociale, mais n'est pas l'être de temps. D'où la question : où est le temps, est-ce un objet que l'on pourrait saisir ? Pour Augustin : non ! Ce n'est ni un objet qu'on peut saisir, ni une simple mesure.

« Ce qui me paraît maintenant avec certitude, et que je connais clairement, c'est que les choses futures et les passées ne sont point, et qu'à proprement parlé on ne saurait dire qu'il y ait trois temps : le passé, le présent et le futur. Mais peut-être on pourrait dire qu'il y a trois temps : le présent des choses passées, le présent des choses présentes et le présent des choses futures. Car je trouve dans l'esprit ces trois choses que je ne trouve nulle part ailleurs : un souvenir présent des choses passées, une attention présente des choses présentes et une attente présente des choses futures. Néanmoins que l'on dise si l'on veut, comme on a accoutumé de le dire improprement, qu'il y a trois temps : le passé, le présent et l'avenir, qu'on le dise si l'on veut, je ne m'en soucie point, je ne m'y oppose point, je ne le trouve point mauvais, pourvu toutefois qu'on entende ce que l'on dit et qu'on ne s'imagine pas que ce qui est à venir soit déjà, et que ce qui est passé soit encore. Car il est sans doute qu'il y a fort peu de choses dont nous parlions proprement, et qu'il y en a plusieurs dont nous parlons improprement, mais on ne laisse pas néanmoins de comprendre ce que nous voulons dire³⁰ »

Augustin prend l'exemple du chant pour montrer ce qu'est le temps :

« Je m'apprête à chanter un air que je connais. Avant de commencer c'est mon attente qui se fixe sur l'ensemble de l'œuvre, mais dès que j'ai commencé, à mesure que les parties prélevées sur mon attente deviennent du passé, c'est ma mémoire qui se tend vers elle, et ainsi les forces vives de mon activité se trouvent distendues entre deux pôles : la mémoire, en raison de ce qui est déjà proféré, et l'attente, en raison de ce qui va l'être. Et cependant mon attention est là, présente, elle, par qui transite le futur pour se faire passer. A mesure que se développe ce mouvement, plus s'abrège l'attente et s'allonge la mémoire, jusqu'à temps qu'il n'y ait plus attente et que l'action achevée soit tout entière passée dans la mémoire. Et ce qui se produit pour l'ensemble de l'œuvre, s'accomplit pour chacune de ses parties, pour chacune de ses syllabes. Il en va de même pour une action plus ample dont ce chant n'est sans doute qu'une faible parcelle, de même pour la vie humaine toute entière, dont les actes en constituent autant de parties, de même pour toute la succession des générations humaines, dont toutes les vies humaines constituent les parties³¹».

³⁰ Chapitre 20, op. cit.

³¹ Op.cit.

II. La mécanique

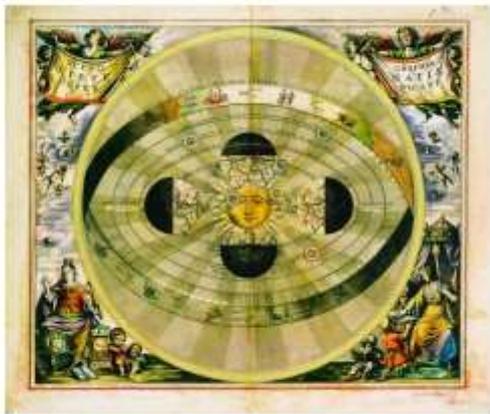
...baptisée « Reine des Cieux » par James Maxwell³²

« Le temps absolu, vrai et mathématique, sans relation à rien d'extérieur, coule uniformément, et s'appelle *durée*. Le temps relatif, apparent et vulgaire, est une mesure sensible et externe d'une partie de durée quelconque (égale ou inégale) prise du mouvement : telles sont les mesures d'*heures*, de *jours*, de *mois* etc, dont on se sert ordinairement à la place du temps vrai »

Isaac Newton³³

Copernic (1473-1543) développe et défend la théorie de l'héliocentrisme, selon laquelle les planètes, dont la Terre tournent autour du Soleil placé au centre de l'univers.

Le système du monde selon Copernic



Le système du monde selon Copernic, planche extraite d'un atlas de Andrea Cellarius, édition de 1661.



La révolution copernicienne

Kepler (1571-1630) établit trois lois essentielles qui décrivent le mouvement des planètes autour du Soleil :

³² Dans un courrier à son collègue Peter Tait, 1873

³³ In *Principes Mathématiques de la Philosophie Naturelle* (*Philosophiæ naturalis principia mathematica*, Londres - 1687)

1^{ère} loi : Les planètes du système solaire décrivent des trajectoires elliptiques, dont le Soleil occupe l'un des foyers.

2^{ème} loi : "Des aires égales sont balayées dans des temps égaux."

3^{ème} loi : $\frac{T^2}{a^3} = \text{const}^{\text{te}}$ où T est la période de révolution et a le demi grand axe de l'ellipse.

La compréhension du mouvement quant à lui est restée sans évolution pendant deux mille ans. Elle était basée sur l'intuition. La mise en mouvement et le maintien de celui-ci était en connexion avec l'action de pousser, soulever, tirer. Un mouvement rapide était associé à une pousser vigoureuse. Cette vision incorrecte était due à Aristote. Pour lui « *le corps en mouvement s'arrête quand la force qui le pousse ne peut plus agir de façon à le pousser* »³⁴.

Galilée (Pise 1564-Arcetri 1642) fait une expérience de pensée : il imagine un homme qui pousse un chariot. Ce dernier avance, on cesse de pousser, rapidement le chariot s'arrête. Que faut-il pour que le chariot poursuive plus longtemps son mouvement avec la même poussée initiale ? On perfectionne la rondeur des roues, on lisse la route, on huile toutes les parties qui génèrent de frottements. Après chaque modification, on s'aperçoit que le chariot va un peu plus loin. Il est alors clair que si on parvenait à éliminer toutes les causes de frottement ou d'obstacle au mouvement, le chariot ne s'arrêterait pas. Cette expérience de pensée faite par Galilée détruit la méthode basée sur une vision intuitive. Galilée crée et emploie le raisonnement scientifique. C'est une conquête qui marque le début réel de la physique. Il découvre donc qu'il ne faut pas demander à la nature la cause de son état de mouvement si celui-ci est uniforme, pas plus qu'il ne faut lui demander la cause de son état de repos : le mouvement uniforme et le repos se maintiennent d'eux-mêmes, éternellement, si rien ne vient les perturber. Ainsi Galilée écrit :

*« Une vitesse quelconque imprimée à un corps se conserve rigoureusement aussi longtemps que les causes extérieures d'accélération ou de ralentissement sont écartées, condition qui se réalise seulement dans le plan horizontal ; car dans les plans déclives il existe déjà une cause d'accélération, tandis que dans les plans qui vont en montant il existe une cause de ralentissement. D'où il suit que le mouvement sur le plan horizontal est perpétuel ; car, si la vitesse est uniforme, elle ne peut être affaiblie ni diminuée et encore moins supprimée. »*³⁵

³⁴ In «*Les mécaniques* » Aristote

³⁵ Galilée, *Discours concernant deux sciences*, PUF, 1995



Portrait de Galileo Galilei par Giusti Sustermans en 1636

Il s'ensuit l'énoncé du principe d'inertie :

« *Tout corps persévère dans son état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite, à moins qu'il ne soit déterminé à changer cet état par des forces agissant sur lui* ».

Ces travaux amènent Galilée notamment :

- à donner la première formulation du principe d'inertie,
- à établir la loi de la chute des corps dans le vide³⁶,
- à pressentir la loi de composition des vitesses
- à établir l'isochronie des oscillations du pendule.

Newton s'appuiera sur cette découverte et précisera dans ses *Principia*³⁷ :

« ...Une force imprimée est une action exercée sur un corps pour changer son état de repos ou de mouvement uniforme sur une ligne droite. Cette force réside uniquement dans l'action et ne reste plus dans le corps quand cette dernière est finie. Car le corps conserve tout état nouveau qu'il acquiert par sa *vis inertiae* seulement. Les forces imprimées peuvent avoir des origines diverses : la percussion, la pression ou une force centripète... »

Newton (Londres 1642-1727)³⁸ est le "Nouveau Moïse" à qui furent montrées les tables de la loi.

³⁶ Dans son « *Discours sur deux sciences nouvelles* » publié en 1638, à Leyde en Hollande et qui sont « La mécanique et les mouvements locaux », Galilée dit notamment : « *Nous apportons sur le sujet le plus ancien une science absolument nouvelle. Il n'est peut-être rien dans la nature d'antérieur au mouvement, et les traités que lui ont consacrés les philosophes ne sont petits ni par le nombre ni par le volume; pourtant, parmi ses propriétés, nombreuses et dignes d'être connues sont celles qui, à ma connaissance, n'ont encore été ni observés ni démontrées. Certaines, plus apparentes, ont été remarquées, tel le fait que le mouvement naturel des graves, en chute libre, est continuellement accéléré; selon quelle proportion toutefois, se produit cette accélération, on ne l'a pas établi jusqu'ici: nul en effet, que je sache, n'a démontré que les espaces parcourus en des temps égaux par un mobile partant du repos ont entre eux même rapport que les nombres impairs successifs à partir de l'unité. On a observé que les corps lancés, ou projectiles, décrivent une courbe d'un certain type; mais que cette courbe soit une parabole, personne ne l'a mis en évidence. Ce sont ces faits, et d'autres non moins nombreux et dignes d'être connus, qui vont être démontrés, et ainsi — ce que j'estime beaucoup plus important — ouvrir l'accès à une science aussi vaste qu'éminente, dont mes propres travaux marqueront le commencement et dont des esprits plus perspicaces que le mien exploreront les parties les plus cachées* ».

³⁷ *Philosophiae naturalis principia mathematica*, les Principes mathématiques de la philosophie naturelle

³⁸ Les dates du 25 décembre 1642 et 20 mars 1727 que l'on trouve, notamment sur son tombeau à l'abbaye de Westminster, pour la naissance et le décès d'Isaac Newton font référence au calendrier



Portrait d'Isaac Newton âgé de 46 ans par Godfrey Kneller (1689)

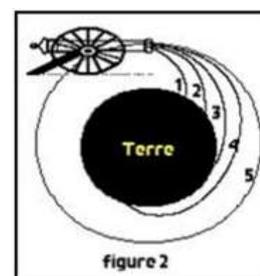
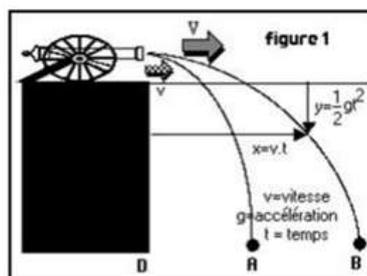
*"Nature and Nature's laws lay hid in night :
God said, let Newton be! And all was light"*

(projet d'épigramme de 1728 dû à Alexander Pope
– Londres 1688 -Twickenham 1744)

*("La Nature et ses lois gisaient, cachées dans la nuit :
Dieu dit : Que Newton soit ! Et tout fut lumière")*

Newton fait la synthèse de deux développements convergents :

a) il montre que les lois de **Kepler** (Weil, Wurtemberg 1571- Ratisbonne 1630) et la chute des corps de **Galilée** correspondent au même phénomène. Le mouvement des corps soumis à la gravité s'effectue selon des trajectoires dites coniques, paraboles pour la chute des corps sur Terre, ellipse pour le mouvement des planètes.



b) le calcul infinitésimal principalement dû à **Gottfried Wilhelm Leibniz** (Leipzig 1646-Hanovre 1716) :

$$v = \frac{dx}{dt}$$

julien anglais, mais correspondent bien au 4 janvier 1643 et au 31 mars 1727 du calendrier grégorien ; lequel ne fut adopté en Grande-Bretagne qu'en 1752, avec pour conséquence supplémentaire l'adoption de la date du 1^{er} janvier comme jour de l'an (avant 1752, le changement d'année s'effectuait en Angleterre le 25 mars).



Portrait de Gottfried Wilhelm Leibniz • Crédits : Johann Friedrich Wentzel

Newton montre que la constante de la 3^{ème} loi de Kepler vaut $\frac{4\pi^2}{G(M+m)}$ où M et m sont les masses des deux corps qui gravitent l'un autour de l'autre et la constante G est la constante universelle de gravitation $G = 6,67 \times 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}$

Le problème sur lequel se concentre la physique newtonienne est le calcul de la dérivée seconde : l'accélération subie à chaque instant par chaque point du système :

$$\begin{array}{ccccc}
 & & \textit{intégration} & & \textit{intégration} \\
 \mathbf{a}(\mathbf{t}) = \mathbf{x}''(\mathbf{t}) & \Rightarrow & \mathbf{v}(\mathbf{t}) = \mathbf{x}'(\mathbf{t}) & \Rightarrow & \mathbf{x}(\mathbf{t}) \\
 \textit{accélération} & & \textit{vitesse} & & \textit{trajectoire}
 \end{array}$$

Pour cela Newton développe la notion d'espace en soi, « l'espace boîte », et de temps en soi. Si on vidait l'univers de toute la matière qu'il contient, il resterait l'espace, si plus rien n'advenait, il resterait le temps qui s'écoule. Newton mathématise le temps et l'espace et en fait une émanation de Dieu « *sensorium Dei* », c'est-à-dire le lieu où Dieu perçoit toute chose.

Dans le langage newtonien « *accélération* » est équivalent à « *force* ». Pour toute description dynamique d'un système il suffit de connaître position et vitesse de chacun des points à un instant donné. La nature des forces dynamiques peut être déduite d'un état instantané du système ($\vec{F}(M) = -\vec{\nabla}E_{\text{potentielle}}$). L'intégration des équations dynamiques déploiera les trajectoires.

La science newtonienne triomphe par la découverte qu'une seule force (la force gravitationnelle) détermine le mouvement des planètes, des comètes et des corps qui tombent sur la terre. Newton crée le concept d'« espace vide » et le paramètre « temps » pour décrire les phénomènes qui adviennent. Pour lui ils existent indépendamment des choses. Si on retire toute la matière de l'univers, il reste l'espace vide. Il en est de même pour le temps : si aucun phénomène ne se produit, le temps existe et s'écoule néanmoins. Le temps newtonien est indépendant des phénomènes qui se produisent dans l'univers, il est généré depuis l'extérieur de celui-ci. Dans la

conception newtonienne « *l'univers dans sa globalité évolue par rapport à quelque notion absolue du temps générée de l'extérieur* »³⁹.

Ainsi la force d'attraction entre deux corps de masses respectives M_1 et M_2 dont les centres de gravité sont séparés d'une distance r_{12} s'écrit :

$$\vec{F} = G \frac{M_1 M_2}{r_{12}^2} \vec{u}$$

Où $G = 6,67 \times 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}$ est la constante gravitationnelle

\vec{u} est le vecteur unitaire reliant des centres de gravité des deux corps

Le changement et la description du monde se réduisent à un ensemble de trajectoires. Ces dernières ont trois attributs :

- la légalité
- le déterminisme
- la réversibilité

Lorsque les trajectoires sont données "tout est donné" selon le mot de **Bergson** (Paris, 1859-1941). A la généralité des lois de la dynamique répond l'arbitraire des conditions initiales et donc l'arbitraire des évolutions particulières (explication complète du monde et de sa diversité).

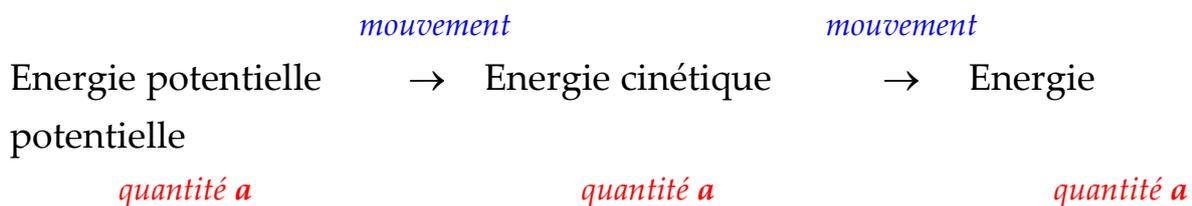
La réversibilité est implicitement affirmée par tous les fondateurs de la dynamique (entre autres **Galilée** et **Huygens** [*La Haye 1629-1695*]), chaque fois qu'ils voulaient mettre en lumière l'équivalence entre *cause* et *effet*, sur laquelle ils entendaient fonder leur description du monde (l'expérience imaginaire d'une balle parfaitement élastique qui rebondit indéfiniment à la même hauteur h : on ne peut discerner quelle est la cause, quel est l'effet entre la chute depuis la hauteur h et le décollage vertical du sol avec une accélération non nulle).

La structure des équations est telle que si les vitesses de tous les points sont instantanément retournés, tout se passe comme si l'on remontait le temps, car cette opération est exactement équivalente à remplacer t en $-t$ dans les équations en laissant les vitesses inchangées. Du point de vue de la mécanique newtonienne faire remonter le temps à un système est équivalent à faire remonter sa trajectoire à chaque point de ce système.

³⁹ Lee Smolin, *La renaissance du temps, pour en finir avec la crise de la physique*. Dunod 2014

Pourtant cette réversibilité est clairement symbole de l'étrangeté du monde décrit par la dynamique : on sait l'impression d'absurdité que provoquent un film projeté à l'envers, un encrier brisé qui se reconstitue se remplit et remonte sur la table, un rameau qui rajeunit et redevient bourgeon, toutes évolutions définies par la dynamique newtonienne comme possibles au même titre que celles que nous connaissons.

Le principe de conservation de l'énergie ($E_{\text{totale}} = E_{\text{cinétique}} + E_{\text{potentielle}}$) est la traduction sous forme syntaxique du langage dynamique. Les machines mécaniques opèrent des transferts d'énergie sans en modifier la nature (changements quantitatifs et non qualitatifs) : leur rendement est égale à 1 (c'est-à-dire 100%), l'intégralité de l'énergie est transformée, utilisable.



Suivent quelques citations éclairantes sur la mécanique et ses limites :

« *La prise en compte simultanée de toutes ces causes de mouvement et la caractérisation de ces mouvements par des lois exactes permettant des calculs faciles excède, si je ne me trompe pas, la puissance de n'importe quel esprit humain* ».

Isaac Newton.

(cité dans Gregory Laughlin,
"The solar system's extended shelf life",
Nature, 459 : 781-2, 2009.)

« Mais lors même que les lois naturelles n'auraient plus de secret pour nous, nous ne pourrions connaître la situation 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 ».

Henri Poincaré,

Calcul des probabilités. (Cité dans Hubert Krivine,
La Terre, des mythes au savoir.)

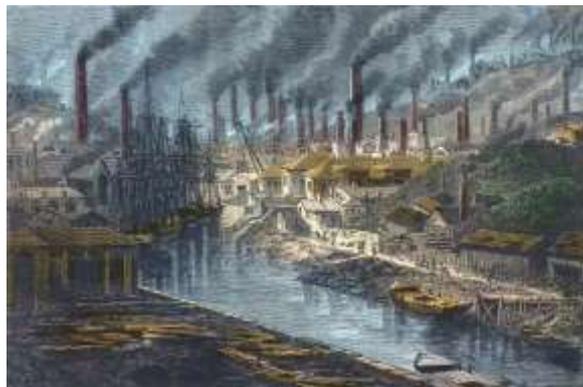
III. L'énergie et l'ère industrielle

« Le présent est fait de déformations du passé et d'ébauches imprécises de l'avenir ».

Pierre Reverdy.
Le livre de mon bord.



Le fardier à vapeur (1770-71) de Nicolas Joseph Cugnot ⁴⁰ (1725-1804), Conservatoire National des Arts et Métiers - Paris



Angleterre, la révolution industrielle

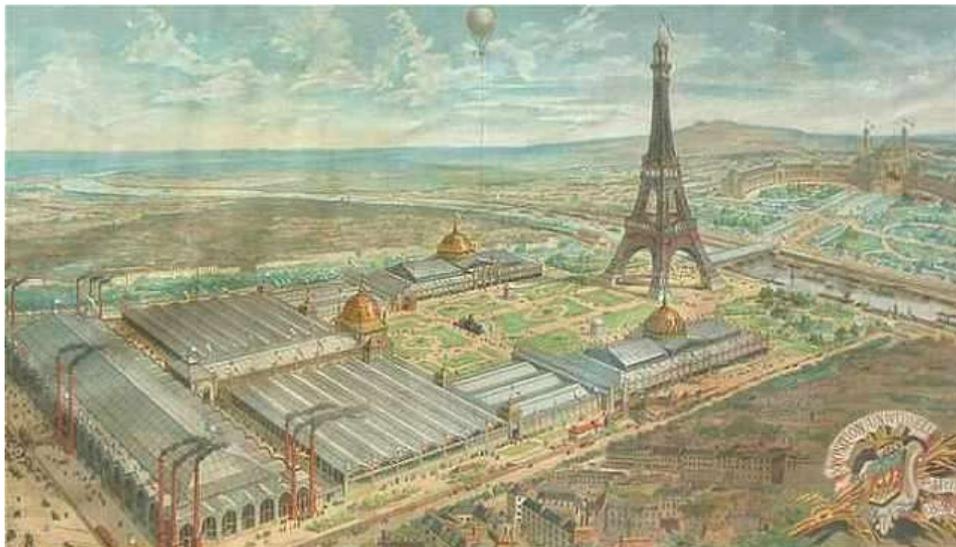
⁴⁰ Le fardier à trois roues (1769) fut suivi d'un nouveau fardier à quatre roues en 1770.



*Le laminoir en fer (1872/75),
Adolph von Menzel.*



*Lithographie représentant la grande nef du palais de l'industrie à
l'Exposition Universelle de 1855*



Exposition universelle de 1889

La maîtrise de la science du feu, donc de la transformation de l'énergie, permet de concevoir et fabriquer de nouveaux types de machines en grande séries, une nouvelle architecture utilisant métal et verre issus d'une industrie très énergivore

Au XVIII^{ème} siècle apparaissent les premières machines à vapeur et avec elles l'utilisation du feu qui transforme les choses. Avec le feu les corps entrent en réactions chimiques, se dissolvent, se dilatent, fondent, s'évaporent. Le transfert de chaleur entraîne des variations de volume qui provoquent des effets mécaniques.

Joseph Fourier (Auxerre 1768-Paris 1830), Préfet de l'Isère, obtient en 1811 le prix de l'Académie pour son traitement de la propagation de la chaleur dans les solides :

1^{ère} loi de Fourier : "le flux de chaleur entre deux corps est proportionnel au gradient de température entre ces deux corps" (énoncé qui généralise l'observation que lorsque deux corps à des températures différentes sont mis en contact ils échangent une quantité de chaleur proportionnelle à leur différence de température) :

$$\vec{\Phi} = -A \cdot \vec{\nabla} T$$

2^{ème} loi de Fourier :

Le flux de chaleur se propage selon l'équation suivante :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = A \cdot \Delta T$$

Il se révèle impossible de mettre ce processus de propagation en relation avec les forces et accélérations dynamiques. Les lois de la mécanique ne permettent donc pas d'expliquer ce phénomène. Dès lors, comme à chaque fois qu'elle est face à un fait qu'elle est incapable d'interpréter, la science va rénover son corpus de théories ou élaborer un nouveau champ de concepts, une nouvelle théorie.

A l'équilibre dynamique entre forces, décrit en mécanique newtonienne, s'ajoute désormais l'équilibre thermique puisque la propagation de la chaleur tend toujours à établir une distribution homogène des températures dans le corps où elle se produit. De plus il est clair que ce phénomène est irréversible : la chaleur a la propriété de se répandre, de s'égaliser, de ne jamais se concentrer spontanément pour créer des différences de température.

Etudier le comportement lié à la chaleur, c'est définir un système non pas comme en dynamique par la position et la vitesse de ses constituants (10^{23} molécules

par cm^3), mais par un ensemble de paramètres macroscopiques (V , volume, P , pression, T , température, ΔT , $\vec{\nabla}T$, ρ_i , masse volumique du constituant i). Ces paramètres définissent la composition du système ainsi que ses relations avec le reste du monde (conditions aux limites) dès lors défini comme "milieu".

A ce stade de l'exposé pour approcher davantage le problème du temps et de son écoulement irréversible il faut aborder plus en détail le très intéressant cas du moteur thermique et sa comparaison avec le moteur mécanique idéal.

Un moteur mécanique se borne à restituer sous forme de travail une énergie potentielle qu'une précédente interaction avec le monde lui a conférée : cause et effet sont de même nature, équivalents.

Dans un moteur thermique les échanges de chaleur entraînent un changement des propriétés mécaniques : dilatation ou contraction. Le mouvement du piston résulte d'une transformation intrinsèque du système et non simplement d'une transmission de mouvement. Le moteur thermique n'est pas un dispositif passif, il produit du mouvement à proprement parler. Dès lors se pose le problème du rendement.



L'avènement de l'utilisation des moteurs thermiques

[Sadi Carnot](#) ⁴¹ (Paris, 1796-1832) propose une description très progressiste et euristique des machines thermiques.

⁴¹ Fils aîné de [Lazare Carnot](#), homme politique français, député à l'Assemblée Législative, puis à la Convention, ensuite Général de l'armée napoléonienne. Sadi est aussi l'oncle de l'autre [Sadi Carnot](#), Président de la République Française du 3 décembre 1887 au 25 juin 1894, le lendemain de [son assassinat](#) à Lyon par un anarchiste italien.

Le moteur fonctionne selon un cycle : la source chaude donne de la chaleur Q_1 au moteur \rightarrow le moteur proprement dit transforme (partiellement) cette quantité de chaleur en travail $W \rightarrow$ le moteur revient à son état initial thermique et mécanique par contact avec une source froide (à laquelle il cède la chaleur Q_2 qu'il n'a pas transformé en travail). Ce fonctionnement est basé sur le **Premier Principe de la Thermodynamique** :

$$\boxed{W + Q_1 + Q_2 = 0}^{42}$$

où W est le travail fourni par le moteur ($W < 0$), Q_1 (> 0) la quantité de chaleur reçue de la source chaude (à température T_1) par le moteur, Q_2 (< 0) la quantité de chaleur reçue du moteur par la source froide (à température $T_2 < T_1$).

Le travail produit se paie d'un flux de chaleur Q_2 qui diminue la différence de température entre les sources. Selon la physique newtonienne (qui n'est pas satisfaisante pour expliquer ces phénomènes) le travail mécanique produit et la diminution de la différence de température entre les sources sont reliés idéalement par une équivalence réversible. Cette approche newtonienne signifie que : « la machine fonctionnant à l'envers peut restaurer la différence initiale de température en consommant le travail produit », ce qui n'est évidemment jamais observé.

Rudolf Clausius (Köslin, Poméranie 1822 - Bonn 1888) établit que lors d'une transformation cyclique réversible⁴³ (voir définition plus loin dans la citation de **Max Planck** [*Kiel 1858-Göttingen 1947*]) entre deux sources à températures T_1 et T_2 , les quantités de chaleur échangées avec les sources sont reliées aux températures de ces sources de la façon suivante :

⁴² Cette relation est un cas particulier du 1^{er} principe de la thermodynamique qui, partant de l'identification du « système » étudié d'une part (ici le moteur), de la définition d'autre part d'une fonction qui permet de caractériser son état : la « fonction d'état » *énergie interne*, notée U , stipule que tout changement d'état a pour conséquence une variation ΔU de l'énergie interne et que celle-ci est égale à la somme des travaux et quantités de chaleur échangés avec l'extérieur. Le 1^{er} principe dans son expression la plus générale s'écrira donc : $\Delta U = W + Q_1 + Q_2$, où $\Delta U = 0$ dans le cas d'un cycle de transformations.

⁴³ cas limite où l'ensemble {système + environnement} passe, dans un sens ou dans l'autre, par une suite d'états d'équilibre. Celui-ci est en réalité impossible car on ne peut éliminer totalement les phénomènes dissipatifs (voir exemple 2 ci-dessus). Néanmoins on peut le considérer comme un cas limite d'une transformation quasi-statique où l'on pourrait négliger les phénomènes dissipatifs

$$\frac{Q_1}{Q_2} = -\frac{T_1}{T_2}$$

qui, dans le cas d'un nombre quelconque de sources devient :

$$\sum_i \frac{Q_i}{T_i} = 0$$

Et :

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0$$

dans le cas d'une infinité de sources.

Ces relations représentent différentes formes de l'égalité de **Clausius** qui ne s'intéresse qu'au seul objet idéal (sa démonstration est assez simple et se fait en définissant la température thermodynamique θ d'une source et en montrant qu'elle est identifiable à la température absolue T).

Cependant cette science qui décrit des objets idéaux ne satisfait plus les physiciens qui veulent décrire la nature elle-même, y compris les pertes. Ceci représente le nouveau problème de l'irréversibilité en physique. Comment décrire non seulement les idéalizations mais aussi ce qui se passe dans les machines réelles ? Quelle est la nature des perturbations irréversibles qui diminuent le rendement ? **Clausius** montre que pour des machines réelles on a :

$$\frac{Q_1}{Q_2} < -\frac{T_1}{T_2} \text{ ou encore : } \oint \frac{\delta Q}{T} < 0$$

(inégalités de **Clausius** démontrables par des considérations géométriques et physiques simples à partir du diagramme de Raveau).

C'est **Carnot** qui identifie le phénomène universel de propagation de la chaleur comme l'origine des pertes de puissance du moteur thermique. : $Q_1 \Rightarrow W \Rightarrow |Q_2| < |Q_1|$. Puisque la propagation de la chaleur est synonyme de perte de rendement, elle deviendra dès **1852**, tendance à la dégradation universelle de l'énergie mécanique. Et **Thomson** (Lord Kelvin 1824-1907) propose l'énoncé suivant du 2^{ème} Principe de la Thermodynamique⁴⁴ :

⁴⁴ Et quelques autres énoncés :

« *La transformation intégrale d'une quantité de chaleur en travail est impossible* »

Le monde décrit par **Thomson** est comme une machine au sein de laquelle la conversion d'une quantité de mouvement ne peut se faire qu'au prix d'un gaspillage irréversible d'énergie, d'une dissipation inutile d'une certaine quantité de chaleur.

« *Ne pas connaître le deuxième principe de la thermodynamique est comme ne jamais avoir lu une œuvre de Shakespeare* »

C.P. Snow

Par ailleurs nous avons vu que la propagation de la chaleur est provoquée par les différences de températures, et les différences productrices d'effets ne cessent de décroître au sein de la nature ; le monde, de conversion en conversion, épuise ces (ses) différences et se dirige vers l'état final décrit par **Fourier** : l'état d'équilibre thermique où aucune différence ne subsiste plus qui pourrait produire un effet. Ceci étant clairement établi il était nécessaire de décrire quantitativement cette irréversibilité. La recherche d'une *fonction d'état* qui décrive à la fois cette irréversibilité et le retour à l'état initial d'un système accomplissant un cycle aboutie à la création de la grandeur **entropie S** définie par sa variation :

$$\Delta S = \int_A^B \frac{\delta Q}{T}$$

ΔS est la variation d'entropie entre les états A et B calculée selon une transformation réversible (donc idéale) entre ces deux états (voir annexe A). Un système isolé subissant une transformation spontanée voit son entropie augmenter, et en particulier l'entropie de l'univers augmente pour une transformation quelconque.

" Die Energie der Welt ist konstant

Die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu"

(**Clausius**).

Enoncé initiale : "Un système isolé qui a subi une évolution ne peut revenir (spontanément) à son état initial"

Enoncé de Jean Perrin : "L'entropie d'un système isolé croît au cours de toute transformation spontanée" (ce qui mène à la mort entropique de l'univers).

*("L'énergie de l'univers est constante
L'entropie de l'univers va vers un maximum").*

Tout système isolé, évolue spontanément vers un état d'équilibre plus stable. L'état d'équilibre apparaît pour lui comme un véritable "attracteur" des états de non équilibre, et nous pouvons dire, en généralisant, que l'évolution vers un état attracteur est différente de toute autre évolution, et particulièrement l'évolution d'un état attracteur vers un autre état attracteur lorsque le système est contraint à évoluer. **Max Planck** souligna clairement la différence entre ces deux modes d'évolution.

Il écrit :

"La Nature privilégie certains états ; la croissance irréversible de l'entropie décrit l'approche du système vers un état qui l'attire, qu'elle préfère, et dont elle ne s'éloignera pas spontanément. En se plaçant à ce point de vue il ne peut donc exister de processus dont l'état final serait un objet d'attrait moindre pour la Nature que l'état initial. Les changements réversibles sont un cas limite dans lequel la Nature a autant de propension pour l'état initial que pour l'état final ; c'est pourquoi le passage est possible de l'un à l'autre dans les deux sens"⁴⁵.



⁴⁵ Max Planck, *Initiation à la Physique*, Flammarion 1941, p 18-19



Détail de l'horloge astronomique de Prague, qui est une allégorie du deuxième principe

« Bien que des événements systématiques s'y déroulent, ils sont entraînés par la génération d'un désordre plus grand ailleurs lors de la chute du poids. La nourriture est comme le poids, les enzymes comme les rouages et nos propres actions comme le mouvement des jacquemarts. Cela ne veut pas dire qu'il n'y a pas de libre-arbitre, mais l'argument qui démontre son existence ne tiendrait pas dans cette page. »

Peter Atkins⁴⁶

⁴⁶ in Le doigt de Galilée – chapitre 4 : l'entropie, le ressort du changement, Dunod 2004

IV. La synthèse de Boltzmann

L'opposition entre attracteurs (de la thermodynamique) et loi du mouvement (de la mécanique) ouvre le problème de l'articulation entre les deux descriptions. Il fallait accepter comme axiome la diversité qualitative de l'énergie et sa tendance à la dégradation. Il était nécessaire, d'après **Boltzmann** (Vienne 1844 – Duino, près de Trieste 1906), de trouver des concepts physiques nouveaux pour élargir la physique des trajectoires aux situations décrites par la thermodynamique. **Boltzmann** cherche la solution dans le concept de probabilité (permettant de passer de l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique.). La probabilité n'est pas utilisée comme moyen d'approximation, mais comme principe explicatif :

"Population nombreuse" = "Système qui a un comportement nouveau".



*Vols d'étourneaux au crépuscule. Une cohérence d'ensemble émerge dans le mouvement du grand nombre de ces oiseaux, dont chacun semble pourtant être engagé sur une trajectoire imprévisible.
Photographies d'Alain Delorme*

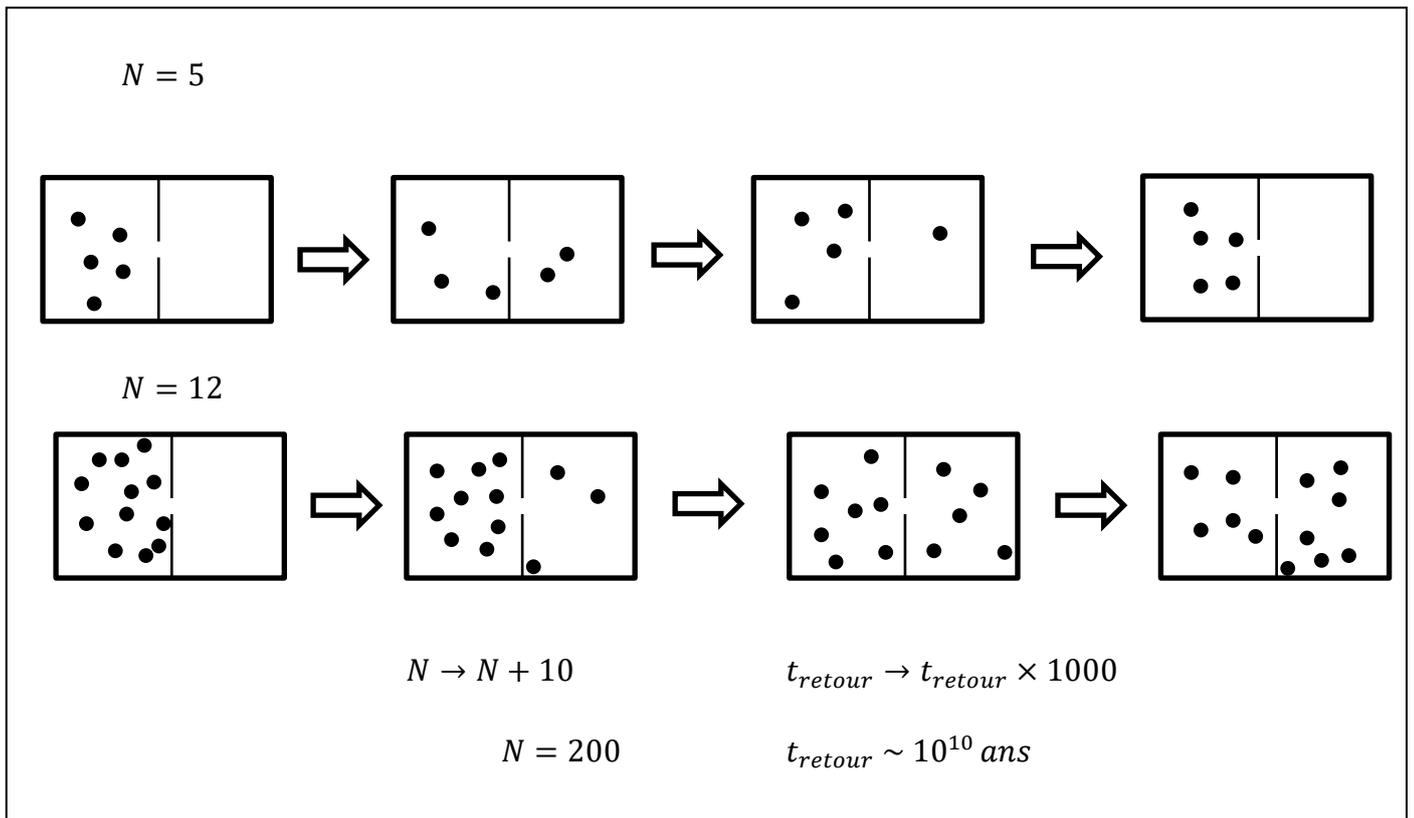
<https://youtu.be/eakKfY5aHmY>

Probabilité et entropie :

Considérons un récipient à deux compartiments dans lesquels on a N boules à répartir. La probabilité p d'observer, à l'issue d'un processus parfaitement aléatoire, n boules dans l'un des compartiments et $N-n$ dans l'autre est proportionnelle à :

$$p \propto \frac{N!}{(N-n)!n!} = C_N^n$$

p est maximum pour $n = N/2$, c'est à dire pour l'équipartition ($n = N/2$), de plus la différence entre les probabilités de deux répartitions différentes est d'autant plus grande que N est grand de sorte que l'écrasante majorité des répartitions est réalisée pour $n = N/2$ lorsque $N = 10^{23}$ (ordre de grandeur du nombre des molécules dans un volume de gaz mesurable). Une répartition telle que le nombre des atomes ne serait pas le même dans deux compartiments de volumes identiques est donc très improbable.



D'après Bernard Dérida, titulaire de la Chaire de Physique Statistique du Collège de France, leçon inaugurale donnée le 10 décembre 2015

Ainsi inévitablement le mélange d'un volume d'encre bleue et d'encre rouge évolue-t-il irréversiblement vers l'obtention d'une encre d'un violet parfaitement homogène. **Boltzmann** fit alors remarquer que l'on pouvait interpréter la croissance irréversible de l'entropie comme l'expression de la croissance du désordre moléculaire, de l'oubli progressif de toute dissymétrie initiale. Et il propose de définir l'entropie par :

$$S = -k_B \ln(p)$$

Ceci est une définition dont la physique statistique montre qu'elle est en parfaite cohérence avec celle de la thermodynamique et permet en particulier de comprendre la singularité des états attracteurs qu'étudie la thermodynamique d'équilibre.

« ... Réconcilier notre compréhension des interactions entre ces briques de matière que constituent atomes et molécules, avec la complexité du monde qui nous entoure, tel est le but de la Physique Statistique. Comment par exemple déduire la température de fusion de l'eau, la forme des cristaux de neige, à partir des seules interactions entre molécules d'eau ?

Boltzmann et Maxwell ont réussi à le faire à la fin du XIXème siècle dans le cas des gaz dilués. Puis leurs lignes de pensée ont permis de décrire les propriétés d'équilibre des fluides, des milieux magnétiques, des alliages. Aujourd'hui la Physique Statistique est devenue incontournable dans des domaines aussi variés que les polymères en solution, la matière condensée, les verres, les plasmas, la matière mole. Mais le saut du microscopique au macroscopique ne se limite pas à la matière inerte. Dès qu'on s'intéresse à un grand nombre d'agents en interaction, qu'il s'agisse de réactions entre espèces chimiques, de dynamique collective d'ensembles de neurones, de mouvements coordonnés de bactéries, ou d'animaux, dans ce qu'on appelle la matière active, de courants d'opinions, de trafic piétonnier ou routier, les méthodes de la Physique Statistique peuvent être mises en œuvre. Dans les cas les plus simples ce changement d'échelle se réduit à une loi des grands nombres, avec des fluctuations d'autant plus petites que le nombre N de constituants est grand (fluctuations en $\frac{1}{\sqrt{N}}$) ... »⁴⁷

⁴⁷ Extrait de la leçon inaugurale donnée le 10 décembre 2015 par Bernard Dériada, titulaire de la Chaire de Physique Statistique du Collège de France, publié dans la collection Collège de France / Fayard, octobre 2016

Les Flèches du temps :



Photo © L'Internaute

C'est la flèche du temps qui porte le concept moderne de temps. Ou plutôt les flèches du temps. Car la physique n'impose pas une flèche du temps universelle.

*Pour les **thermodynamiciens**, elle correspond à une entropie grandissante (le mélange lait/café en haut à gauche : du lait versé dans du café se mélange irréversiblement au niveau macroscopique. Pourtant, au niveau des particules, toutes les réactions sont théoriquement réversibles).*

*Pour les **cosmologistes**, c'est l'expansion de l'univers qui donne sa direction au temps (du Big Bang à l'Univers actuel, en haut à droite).*

*Pour les **astrophysiciens**, la flèche est gravitationnelle, fondée sur l'impossibilité de sortir d'un trou noir une fois entré (matière attirée dans un piège gravitationnel, en bas).*

*Sans compter que la **biologie** introduit son propre cours immuable des choses (évolution des espèces, vieillissement).*

La diversité de ces modélisations est-elle un indice de leur imperfection ?

En conclusion à cet état de l'exposé nous pouvons dire que la thermodynamique d'équilibre apporte une réponse satisfaisante en ce qui concerne un nombre immense de phénomènes physico-chimiques. Cependant cette réponse reste incomplète. On peut en effet se demander si les structures d'équilibre suffisent à interpréter les divers phénomènes de structuration que nous rencontrons dans la nature comme par exemple les systèmes vivants.

V. La thermodynamique du non équilibre

(Ilya Prigogine, Moscou 25 janvier 1917 – Bruxelles 28 mai 2003)

« Et pendant que cette planète continuait à tourner selon la loi fixe de la gravitation, à partir d'un début si simple, une infinité de formes les plus belles et les plus merveilleuses ont évolué, et continuent d'évoluer ».

Charles Darwin.

De l'origine des espèces.

« Prédicibilité : est-ce que le battement des ailes d'un papillon au Brésil peut provoquer une tornade au Texas ? »

Edward Lorentz,

Communication au congrès annuel de
l'American Association for the Advancement of Sciences,
29 décembre 1972.

« Le chaos a eu un rôle déterminant dans la formation et l'évolution de notre système solaire, sculptant une grande part de son architecture visible aujourd'hui. Un corollaire du chaos est que le système solaire actuel est continuellement en train de changer ».

Joseph Burns,

"The four hundred years of planetary science since
Galileo and Kepler", *Nature*, 466 : 575-84, 2010.

La thermodynamique dont nous avons parlé jusqu'à maintenant est la thermodynamique d'équilibre. Elle apporte une réponse satisfaisante en ce qui concerne un nombre immense de phénomènes physico-chimiques. Cependant cette réponse reste incomplète.

↳ On peut en effet se demander si les structures d'équilibre suffisent à interpréter les divers phénomènes de structuration que nous rencontrons dans la nature → Non !
Ainsi Ilya Prigogine nous dit que :

« Les structures d'équilibre résultent de la compensation statistique de l'activité de la foule des constituants élémentaires. Elles sont donc dépourvues d'activité macroscopique,

inertes au niveau global. En un sens également immortelles, une fois formées, elles peuvent être isolées et se maintenir indéfiniment sans avoir besoin d'aucun échange avec l'extérieur⁴⁸ ».

La thermodynamique d'équilibre est linéaire :

- Concerne le domaine proche de l'équilibre
 - Les causes ont des effets qui leur sont proportionnels ou qui en sont des « combinaisons linéaires ».

Un système évolue vers un état stationnaire caractérisé par la production d'entropie minimale compatible avec les contraintes imposées au système.

La thermodynamique non linéaire → loin de l'équilibre

Le développement de la thermodynamique non linéaire est dû à la reconnaissance de l'impossibilité de trouver une méthode générale de définition d'une fonction potentielle pour les systèmes où les flux ne sont pas des fonctions linéaires des forces.

→ Loin de l'équilibre la production d'entropie continue à décrire les différents systèmes thermodynamiques, mais elle ne permet plus de définir un état attracteur, terme stable de l'évolution irréversible.

→ Lorsque la force thermodynamique imposée au système atteint des valeurs assez élevées pour dépasser le régime linéaire, l'immunité des états stationnaires par rapport au désordre moléculaire n'est plus automatiquement acquise.

→ La thermodynamique permet de préciser quels systèmes sont susceptibles d'échapper au type d'ordre qui régit l'équilibre, et à partir de quel seuil, de quelle distance de l'équilibre, de quelle valeur de la contrainte imposée, les fluctuations deviennent capables d'entraîner le système vers un état comportemental différent des comportements usuels des systèmes thermodynamiques.

Exemples :

1) Ecoulements fluides à partir d'une certaine vitesse d'écoulement → apparition de tourbillons (connu depuis longtemps)

⁴⁸ Ilia Prigogine et Isabelle Stengers, *La Nouvelle alliance*, Gallimard 1979



Visualisation des tourbillons de sillage consécutive au passage d'un avion léger à travers un panache de fumée (Source NASA Langley Research Center - EL 1996 00130)

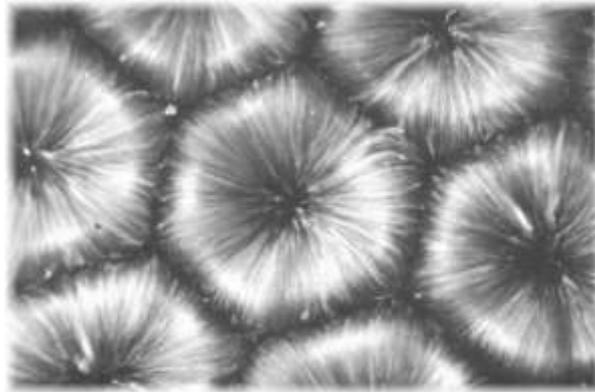


Cyclone Irma à l'approche des Petites Antilles le 5 septembre 2017, à son maximum (MODIS image captured by NASA's Aqua satellite)

2) Instabilité de Bénard : à partir d'une certaine valeur du gradient de température dans un liquide, le mouvement des molécules se structure en cellules hexagonales qui permettent d'accélérer le transport de chaleur (auto organisation).

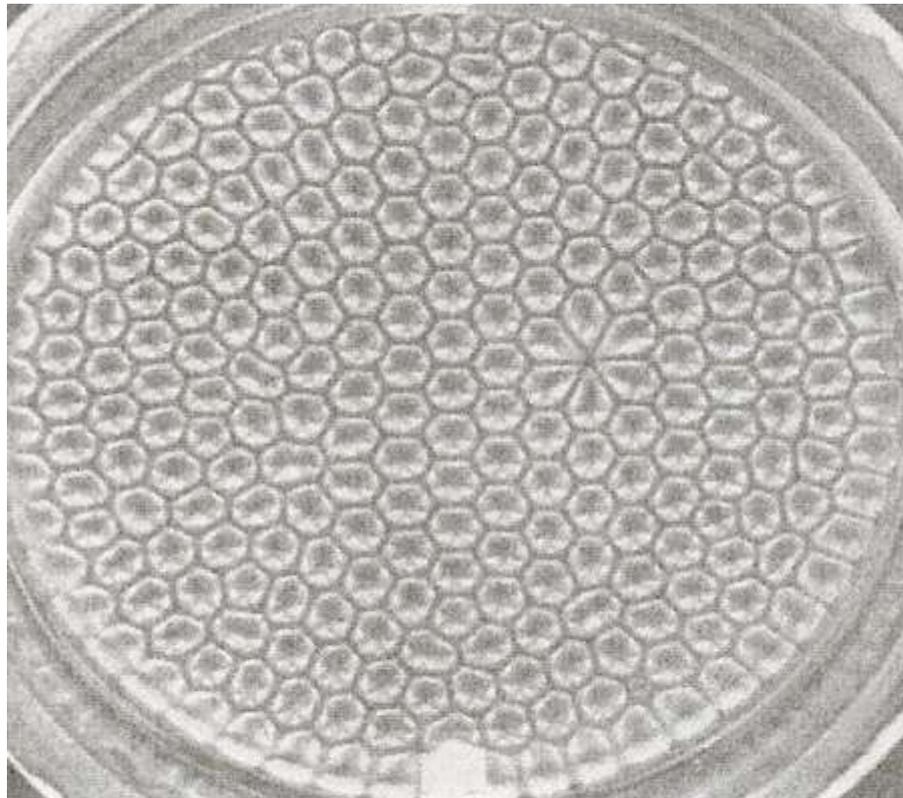
→ Loin de l'équilibre la notion de probabilité qui est au centre du principe d'ordre de Boltzmann perd sa validité. Et simultanément, la tendance au nivellement et à l'oubli des différences n'apparaît plus que comme un cas particulier.

- ⇒ Les flux irréversibles peuvent créer de manière prévisible et reproductible des processus locaux **d'auto organisation**.
- ⇒ Cellules de Bénard : structures dissipatives loin de l'équilibre : dissipation d'énergie et de matière ⇔ source d'ordre.
- ⇒ La dissipation d'énergie est à l'origine de ce que l'on peut appeler des **états nouveaux de la matière** dont la thermodynamique linéaire (proche de l'équilibre) prédit des probabilités de réalisation nulles



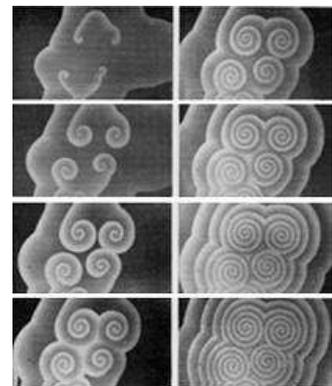
Vue de dessus de cellules de convection thermocapillaire dans une couche d'huile de silicone de 1 mm d'épaisseur, surmontée par de l'air. La lumière réfléchiée par des particules d'aluminium montre le fluide montant au cœur de la cellule hexagonale et descendant sur les bords. Le temps d'exposition est de 10 s, et le fluide traverse la cellule du centre au bord en 2s. La dimension des cellules est de 3,6 mm. Cliché, Yuste & Salan (Van Dyke 1982).

<https://www.youtube.com/watch?v=6BoEKUqDdLc>



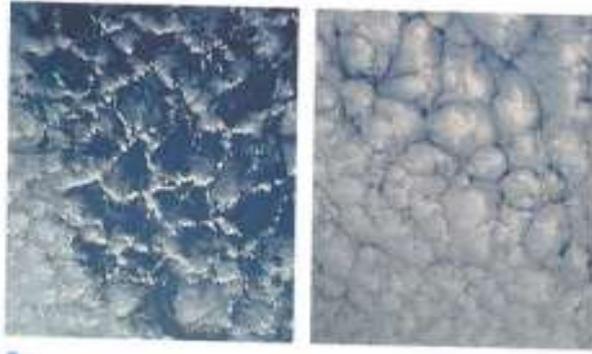
Exemple de la formation de cellules de Bénard dans un système hors équilibre.

Source: Koschmieder E.L., *Bénard cells and Taylor Vortices*, Cambridge University Press, 1993

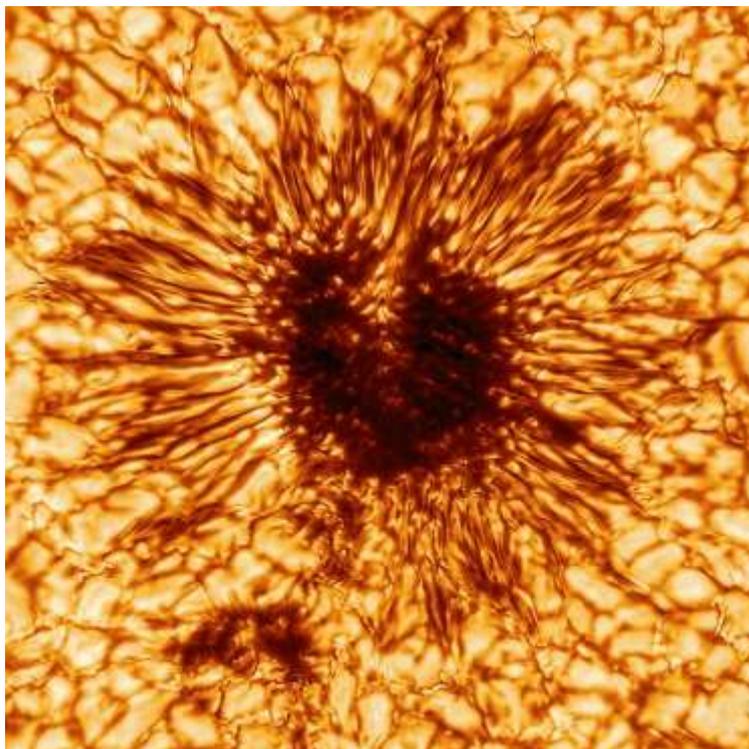


Réaction oscillante - Réaction de Belousov Zhabotinsky

http://www.dailymotion.com/video/xxidxd_reaction-oscillante-reaction-de-belousov-zhabotinsky_tech



Structures nuageuses marquant des cellules de convection quasi hexagonales. A gauche l'air monte par les bords et redescend par le centre. Lorsque l'air monte par le centre des cellules, ce sont les bords qui sont libres de nuages (à droite)⁴⁹.



Tache solaire imagée par le télescope Inouye le 28 janvier 2020. Les détails sans précédent révèlent la structure interne d'une tache sombre. Celle-ci mesurait quelque 16.000 kilomètres de diamètre. © NSO, Aura, NSF
Dans ce système très dissipatif on voit clairement une structuration en cellules quasi hexagonales

3) Les exemples les plus magistraux et merveilleux sont ceux de la constitution des systèmes biologiques. Pensons à la façon dont se constitue le plus sophistiqué des outils de l'être humain et qui lui donne son aptitude à comprendre et à appréhender

⁴⁹ Illustration issue de « Ce que nous disent les fluides », E. Guyon, J.-P. Hulin et L. Petit, Ed. Belin pour la science, 2^{ème} édition, 2011.

le monde : son cerveau ! Lorsque le petit humain naît, son cerveau ne pèse que le cinquième de ce qu'il pèsera à l'âge adulte. Il a déjà l'essentiel de ses neurones, soit quelques cent milliards (10^{11}) de cellules nerveuses, mais les connexions entre elles, les synapses, ont à peine commencé à se créer. Or ce sont elles qui vont constituer l'unité de base de stockage de la connaissance dans le cerveau. Entre la naissance et la puberté, soit en seize années, chaque neurone créera **dix mille connexions** avec ses homologues. Il se créera ainsi un million de milliards (10^{15}) de synapses, soit en moyenne deux millions par seconde ! Qui peut manager une telle quantité de phénomènes dans une cohérence suffisante pour aboutir à la constitution de ce sublime système biologique qu'est le cerveau humain ? Y a-t-il exemple plus fantastique de l'efficacité des **processus dissipatifs** que celui de **l'auto organisation** qui mène au vivant ?



L'évolution créatrice : chaque humain est unique, jamais il n'a été, jamais plus il ne sera, chaque fois unique

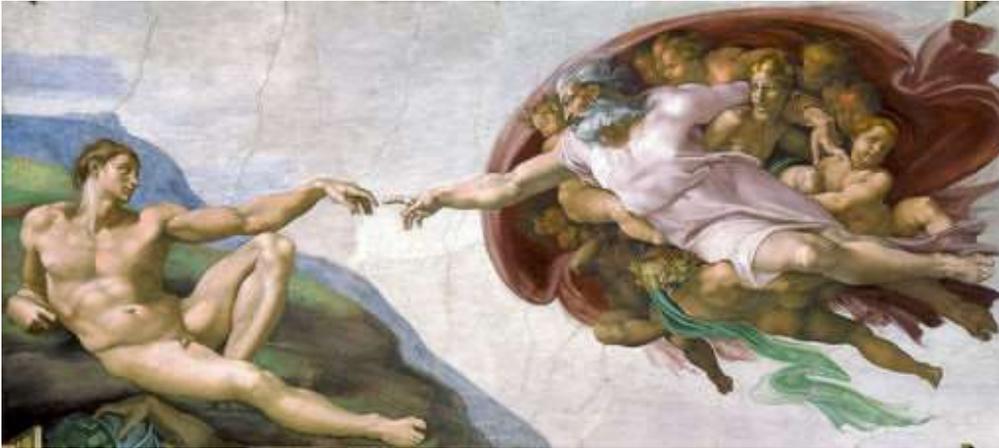
Dans sa leçon inaugurale⁵⁰ pour la Chaire « Dynamiques du vivant » du Collège de France, Thomas Lecuit rappelle que « *l'être humain renouvelle la plupart de ses cellules non neuronales en moins de 10 ans, certains organes comme l'intestin en 5 jours, chaque cellule remplace la plupart de ses constituants moléculaires en quelques heures, chaque organelle cellulaire remplace ses composantes en quelques minutes ou secondes* ». Pour Erwin Schrödinger l'information chimique qui contrôle le vivant et l'hérédité a une double caractéristique de « *la stabilité des formes et les fluctuations stochastiques à l'échelle moléculaire* »⁵¹. Claude Bernard se demandait déjà « *comment un organisme et toute structure biologique vivant conserve-t-il un état physiologique constant, une homéostasie, d'où vient la géométrie stable du vivant dès lors qu'un courant de matière traverse l'organisme, le renouvelle dans sa substance ?* » Thomas Lecuit cherche à éclaircir les mécanismes de déclenchement du vivant en s'appuyant sur « *les études du microscopique qui permettent*

⁵⁰ Prononcée le 27 avril 2017

⁵¹ In *Qu'est-ce la vie, De la physique à la biologie*, Seuil, Coll. Point Sciences, 1986, titre original : *What is life ?* Cambridge University Press, 1944,

de mettre à jour ces dynamiques et permettent de comprendre la spécificité de la matière vivante et de son auto-organisation »⁵²

Le corps se régénère donc en permanence, grâce à l'apoptose, mort programmée des cellules. C'est ainsi que le corps humain perd environ 80 kg de matière chaque année, qu'il renouvelle bien sûr. Le cancer correspond à un dysfonctionnement de l'apoptose : les cellules cancéreuses se multiplient sans mourir, et c'est leur prolifération qui envahit le corps pour finir par l'empêcher de fonctionner.



La création d'Adam, Michel-Ange (Chapelle Sixtine-1511)

⁵² Thomas Lecuit, leçon inaugurale pour la Chaire « Dynamiques du vivant » du Collège de France, 27 avril 2017

Lecture

Quelques citations de "La Fin des Certitudes" de Ilya Prigogine.

On sait qu'Einstein a souvent affirmé que "le temps est illusion". Et en effet, le temps tel qu'il a été incorporé dans les lois fondamentales de la physique, de la dynamique classique newtonienne jusqu'à la relativité et à la physique quantique, n'autorise aucune distinction entre le passé et le futur. Aujourd'hui encore pour beaucoup de physiciens, c'est là une véritable profession de foi : au niveau de la description fondamentale de la nature, il n'y a pas de flèche du temps. Page 10

[...]au cours des dernières décennies, une nouvelle science est née, la physique des processus de non-équilibre. Cette science a conduit à des concepts nouveaux tels que l'auto-organisation et les structures dissipatives qui sont aujourd'hui largement utilisés dans des domaines qui vont de la cosmologie jusqu'à l'écologie et aux sciences sociales, en passant par chimie et la biologie. La physique de non-équilibre étudie les processus dissipatifs, caractérisés par un temps unidirectionnel, et ce faisant elle confère une nouvelle signification à l'irréversibilité.

Page 11

L'irréversibilité ne peut plus être attribuée à une simple apparence qui disparaîtrait si nous accédions à une connaissance parfaite. Elle est une condition essentielle de comportements cohérents de milliards de milliards de molécules. Selon une formule que j'aime à répéter, la matière est aveugle à l'équilibre là où la flèche du temps ne se manifeste pas ; mais lorsque celle-ci se manifeste, loin de l'équilibre, la matière commence à voir ! Sans la cohérence des processus irréversibles de non-équilibre, l'apparition de la vie sur la Terre serait inconcevable. La thèse selon laquelle la flèche du temps est seulement phénoménologique est absurde. Ce n'est pas nous qui engendrons la flèche du temps. Bien au contraire, nous sommes ses enfants. Page 12

Le second développement concernant la révision du concept de temps en Physique a été celui des systèmes dynamiques instables. La science classique privilégiait l'ordre, la stabilité, alors qu'à tous les niveaux d'observation nous reconnaissons désormais le rôle primordial des fluctuations et de l'instabilité [...] Mais comme nous le montrerons dans ce livre, les systèmes dynamiques instables conduisent

aussi à une extension de la dynamique classique et de la physique quantique, et dès lors à une formulation nouvelle des lois de la physique. Cette formulation brise la symétrie entre passé et futur qu'affirmait la physique traditionnelle, y compris la mécanique quantique et la relativité. [...] Dès que l'instabilité est incorporée, la signification des lois de la nature prend un nouveau sens. Elles expriment désormais des possibilités. Pages 12 & 13

D'autres questions sont directement rattachées au problème du temps. L'une est le rôle étrange conféré à l'observateur dans la théorie quantique. Le paradoxe du temps fait de nous les responsables de la brisure de symétrie temporelle observée dans la nature. Mais, plus encore, c'est l'observateur qui serait responsable d'un aspect fondamental de la théorie quantique qu'on appelle la réduction de la fonction d'onde. C'est ce rôle qu'elle attribue à l'observateur qui, nous le verrons, a donné à la mécanique quantique son aspect apparemment subjectiviste et a suscité des controverses interminables. Dans l'interprétation usuelle, la mesure, qui impose une référence à l'observateur en théorie quantique, correspond à une brisure de symétrie temporelle. En revanche, l'introduction de l'instabilité dans la théorie quantique conduit à une brisure de la symétrie du temps. L'observateur quantique perd dès lors son statut singulier ! La solution du paradoxe du temps apporte également une solution au paradoxe quantique, et mène à une formulation réaliste de la théorie. Soulignons que cela ne nous fait pas revenir à l'orthodoxie classique et déterministe ; bien au contraire, cela nous conduit à affirmer encore davantage le caractère statistique de la mécanique quantique. Comme nous l'avons déjà souligné, tant en dynamique classique qu'en physique quantique, les lois fondamentales expriment maintenant des possibilités et non plus des certitudes. Nous avons non seulement des lois mais aussi des événements qui ne sont pas déductibles des lois mais en actualisent les possibilités. Page 13

La question du temps et du déterminisme n'est pas limitée aux sciences, elle est au cœur de la pensée occidentale depuis l'origine de ce que nous appelons la rationalité et que nous situons à l'époque présocratique. Comment concevoir la créativité humaine, comment penser l'éthique dans un monde déterministe ? [...] La démocratie et les sciences modernes sont toutes deux les héritières de la même histoire, mais cette histoire mènerait à une contradiction si les sciences faisaient triompher une conception déterministe de la nature alors que la démocratie incarne l'idéal d'une société libre. Nous considérer comme étrangers à la nature implique un dualisme étranger à l'aventure des sciences aussi bien qu'à la passion d'intelligibilité propre au monde occidental. Cette passion est selon Richard Tarnas

[1], de "retrouver son unité avec les racines de son être". Nous pensons nous situer aujourd'hui à un point crucial de cette aventure au point de départ d'une nouvelle rationalité qui n'identifie plus science et certitude, probabilité et ignorance. En cette fin de siècle, la question de l'avenir de la science est souvent posée. Pour certains, tel Stephen Hawking dans sa Brève histoire du temps [2], nous sommes proches de la fin, du moment où nous serons capables de déchiffrer la "pensée de Dieu". Je crois, au contraire que nous sommes seulement au début de l'aventure. Nous assistons à l'émergence d'une science qui n'est plus limitée à des situations simplifiées, idéalisées, mais nous met en face de la complexité du monde réel, une science qui permet à la créativité humaine de se vivre comme l'expression singulière d'un trait fondamental commun à tous les niveaux de la nature. Page 15

[1]Richard Tarnas "The Passion of the Western Mind", New York, Harmony, 1991, p443. [2]Stephen Hawking, "Une brève histoire du temps", Paris, Flammarion, Collection "Champs", 1991

Les questions étudiées dans ce livre - l'univers est-il régi par des lois déterministes ? Quel est le rôle du temps ? - ont été formulées par les présocratiques à l'aube de la pensée occidentale. Elles nous accompagnent depuis plus de deux mille cinq cent ans. Aujourd'hui, les développements de la physique et des mathématiques du chaos et de l'instabilité ouvrent un nouveau chapitre dans cette longue histoire. Nous percevons ces problèmes sous un angle renouvelé. Nous pouvons désormais éviter les contradictions du passé. Épicure fut le premier à dresser les termes du dilemme auquel la physique moderne a conféré le poids de son autorité. Successeur de Démocrite, il imaginait le monde constitué par des atomes en mouvement dans le vide. Il pensait que les atomes tombaient tous avec la même vitesse en suivant des trajets parallèles. Comment pouvaient-ils alors entrer en collision ? Comment la nouveauté, une nouvelle combinaison d'atomes, pouvait-elle apparaître ? Pour Épicure, le problème de la science, de l'intelligibilité de la nature et celui de la destinée des hommes étaient inséparables. Que pouvait signifier la liberté humaine dans le monde déterministe des atomes ? Il écrivait à Ménécée : "Quant au destin, que certains regardent comme le maître de tout, le sage en rit. En effet, mieux vaut encore accepter le mythe sur les dieux que de s'asservir au destin des physiciens. Car le mythe nous laisse l'espoir de nous concilier les dieux par les honneurs que nous leur rendons, tandis que le destin a un caractère de nécessité inexorable". Les physiciens dont parle Épicure ont beau être les philosophes stoïciens cette citation résonne de manière étonnamment moderne ! [...] Mais avons-nous besoin d'une pensée de la nouveauté ? Toute nouveauté n'est-elle pas illusion ? Aussi la question

remonte aux origines. Pour Héraclite, tel que l'a compris Popper, "la vérité est d'avoir saisi l'être essentiel de la nature, de l'avoir conçue comme implicitement infinie, comme le processus même". Page 17-18

Chacun sait que la physique newtonienne a été détrônée au XX^{ème} siècle par la mécanique quantique et la relativité. Mais les traits fondamentaux de la loi de Newton, son déterminisme et sa symétrie temporelle, ont survécu. Bien sûr, la mécanique quantique ne décrit plus des trajectoires mais des fonctions d'onde (voir section IV de ce chapitre et le chapitre VI), mais son équation de base, l'équation de Schrödinger, est elle aussi déterministe et à temps réversible. Les lois de la nature énoncée par la physique relèvent donc d'une connaissance idéale qui atteint la certitude. Dès lors que les conditions initiales sont données, tout est déterminé. La nature est un automate que nous pouvons contrôler, en principe du moins. La nouveauté, le choix, l'activité spontanée ne sont que des apparences, relatives seulement au point de vue humain. Page 20 Remarque : Le déterminisme est issu de la pensée de l'outil. L'emploi de l'outillage, le processus technique est le prototype du déterminisme intellectuel. Comme il n'existe que très peu de processus techniques qui font usage de processus de type probabilistes, l'incertitude n'apparaît pas dans la logique usuelle qui n'est que le reflet intellectuel de la pratique technique concrète. Mais tout n'est pas outil, il faut comprendre aussi ce que la nature a de naturel. C'est en quoi le point de vue de Prigogine est difficile à assimiler dans ce monde-ci... Il s'agit d'une logique qui n'a pas de précédent dans la pratique technicienne.

De nombreux historiens soulignent le rôle essentiel joué par la figure du Dieu chrétien, conçu au XVII^{ème} siècle comme un législateur tout-puissant, dans cette formulation des lois de la nature. La théologie et la science convergeaient alors. Leibniz a écrit : "...dans la moindre des substances, des yeux aussi perçants que ceux de Dieu pourraient lire toute la suite des choses de l'univers. Quae sint, quae fuerint, quae mox futura trahantur (qui sont, qui ont été, qui se produiront dans l'avenir)". La soumission de la nature à des lois déterministes rapprochait ainsi la connaissance humaine du point de vue divin atemporel. La conception d'une nature passive, soumise à des lois déterministes, est une spécificité de l'Occident. En Chine et au Japon, "nature" signifie "ce qui existe par soi-même". Joseph Needham nous a rappelé l'ironie avec laquelle les lettrés chinois reçurent l'exposé des triomphes de la science moderne.

Remarque : Quant à l'idée qu'une nature passive serait une spécificité de l'Occident, tout dépend de quelle période de l'Occident on parle : l'étymologie grecque du mot physique (physis) par exemple suggère tout le contraire

Dans l'un de ses derniers livres, L'Univers Irrésolu, Karl Popper écrit : "Je considère le déterminisme laplacien - confirmé comme il semble l'être par le déterminisme des théories physiques, et par leur succès éclatant - comme l'obstacle le plus solide et plus sérieux sur le chemin d'une explication et d'une apologie de la liberté, de la créativité, et de la responsabilité humaines". Pour Popper, cependant, le déterminisme ne met pas seulement en cause la liberté humaine. Il rend impossible la rencontre de la réalité qui est la vocation même de notre connaissance : Popper écrit plus loin que la réalité du temps et du changement a toujours été pour lui "le fondement essentiel du réalisme". Dans "Le possible et le réel", Henri Bergson demande "A quoi sert le temps ?... le temps est ce qui empêche que tout soit donné d'un seul coup. Il retarde, ou plutôt il est retardement. Il doit donc être élaboration. Ne serait-il pas alors le véhicule de création et de choix ? L'existence du temps ne prouverait-elle pas qu'il y a de l'indétermination dans les choses ?". Pour Bergson comme pour Popper le réalisme et l'indéterminisme sont solidaires. Mais cette conviction se heurte au triomphe de la physique moderne, au fait que le plus fructueux et le plus rigoureux des dialogues que nous ayons mené avec nature aboutit à l'affirmation du déterminisme. L'opposition entre le temps réversible et déterministe de la physique et le temps des philosophes a mené à des conflits ouverts. Aujourd'hui, la tentation est plutôt celle d'un repli, qui se traduit par un scepticisme général quant à la signification de nos connaissances. Ainsi, la philosophie postmoderne prône la déconstruction. Rorty par exemple appelle à transformer les problèmes qui ont divisé notre tradition en sujets de conversation civilisée. Bien sûr, pour lui les controverses scientifiques, trop techniques n'ont pas de place dans cette conversation.

[...] Mais le conflit n'oppose pas seulement les sciences et la philosophie, Il oppose la physique à tous les autres savoirs. En octobre 1994 Scientific American a consacré un numéro spécial à "La vie dans l'univers". A tous les niveaux, que ce soit celui de la cosmologie, de la géologie, de la biologie ou de la société, le caractère évolutif de la réalité s'affirme de plus en plus. On s'attendrait donc à ce que la question soit posée : comment comprendre ce caractère évolutif dans le cadre des lois de la physique ? Or un seul article, écrit par le célèbre physicien Steven Weinberg, discute cet aspect. Weinberg écrit : "Quel que soit notre désir d'avoir une vision unifiée de la nature, nous ne cessons de nous heurter à la dualité du rôle

de la vie intelligente dans l'univers... D'une part, il y a l'équation de Schrödinger, qui décrit de manière parfaitement déterministe comment la fonction d'onde de n'importe quel système évolue dans le temps. Et puis, d'une manière parfaitement indépendante, il y a un ensemble de principes qui nous disent comment utiliser la fonction d'onde pour calculer les probabilités des différents résultats possibles produits par nos mesures". "Nos mesures ?" Est-il donc suggéré que c'est nous par nos mesures, qui serions responsables de ce qui échappe au déterminisme universel, qui serions donc à l'origine de l'évolution cosmique ? C'est le point de vue que défend également Stephen Hawking dans "Une brève histoire du Temps". Il y expose une interprétation purement géométrique de la cosmologie : le temps ne serait en quelque sorte qu'un accident de l'espace. Page 22

Dans The Emperor's New Mind, Roger Penrose écrit que "c'est notre compréhension actuellement insuffisante des lois fondamentales de la physique qui nous empêche d'exprimer la notion d'esprit (mind) en termes physiques ou logiques". Je suis d'accord avec Penrose : nous avons besoin d'une nouvelle formulation des lois fondamentales de la physique, mais celle-ci ne doit pas nécessairement décrire la notion d'esprit, elle doit d'abord incorporer dans nos lois physiques la dimension évolutive sans laquelle nous sommes condamnés à une conception contradictoire de la réalité. Enraciner l'indéterminisme et l'asymétrie du temps dans les lois de la physique est la réponse que nous pouvons donner aujourd'hui au dilemme d'Épicure. Sinon, ces lois sont incomplètes, aussi incomplètes que si elles ignoraient la gravitation ou l'électricité. Page 24

13. R. Penrose, *The Emperor's New Mind*. Oxford, Oxford University Press, Vintage edition, 1990, p. 4-5.

Au début de ce chapitre, nous avons mentionné les penseurs présocratiques. En fait, les anciens grecs nous ont légué deux idéaux qui ont guidé notre histoire : celui d'intelligibilité de la nature ou, comme l'a écrit Whitehead, de "former un système d'idées générales qui soit nécessaire, logique, cohérent, et en fonction duquel tous les éléments de notre expérience puissent être interprétés" ; et celui de démocratie basée sur le présupposé de la liberté humaine, de la créativité et de la responsabilité. Nous sommes certes très loin de l'accomplissement de ces deux idéaux, du moins nous pouvons désormais conclure qu'ils ne sont pas contradictoires. Page 25

La nature nous présente des processus irréversibles et des processus réversibles, mais les premiers sont la règle, et les seconds l'exception. Les processus macroscopiques, tels que réactions chimiques et phénomènes de transport, sont

irréversibles. Le rayonnement solaire est le résultat de processus nucléaires irréversibles. Aucune description de l'écosphère ne serait possible sans les processus irréversibles innombrables qui s'y déroulent. Les processus réversibles, en revanche, correspondent toujours à des idéalizations : nous devons négliger la friction pour attribuer au pendule un comportement réversible, et cela ne vaut que comme une approximation. Page 26

[...] Après plus d'un siècle, au cours duquel la Physique a connu d'extraordinaires mutations, l'interprétation de l'irréversibilité comme approximation est présentée par la majorité des physiciens contemporains comme allant de soi. Qui plus est, le fait que nous serions alors responsables du caractère évolutif de l'univers n'est pas explicité. Au contraire, une première étape du raisonnement qui doit mener le lecteur à accepter le fait que l'irréversibilité n'est rien d'autre qu'une conséquence de nos approximations consiste toujours à présenter les conséquences du second principe comme évidentes, voire triviales. Voici par exemple comment Murray Gell-Mann s'exprime dans *The Quark and the Jaguar* [17] : "L'explication de l'irréversibilité est qu'il y a plus de manières pour les clous ou les pièces de monnaie d'être mélangés que triés. Il y a plus de manières pour les pots de beurre et de confiture d'être contaminés l'un par l'autre que de rester purs. Et il y a plus de manières pour les molécules d'un gaz d'oxygène et d'azote d'être mélangées que séparées. Dans la mesure où on laisse aller les choses au hasard, on peut prévoir qu'un système clos caractérisé par quelque ordre initial évoluera vers le désordre, qui offre tellement plus de possibilités. Comment ces possibilités doivent-elles être comptées ? Un système entièrement clos, décrit de manière exacte, peut se trouver dans un grand nombre d'états distincts, souvent appelés "microétats ". En mécanique quantique, ceux-ci sont les états quantiques possibles du système. Ils sont regroupés en catégories (parfois appelées macroétats) selon des propriétés établies par une description grossière (coarse grained). Les microétats correspondant à un macroétat donné sont traités comme équivalents, ce qui fait que seul compte leur nombre. " Et Gell-Mann conclut : " L'entropie et l'information sont étroitement liées. En fait, l'entropie peut être considérée comme une mesure de l'ignorance. Lorsque nous savons seulement qu'un système est dans un macroétat donné, l'entropie du macroétat mesure le degré d'ignorance à propos du microétat du système, en comptant le nombre de bits d'information additionnelle qui serait nécessaire pour le spécifier, tous les microétats dans le macroétat étant considérés comme également probables". J'ai cité longuement Gell-Mann, mais le même genre de présentation de la flèche du temps figure dans la plupart des ouvrages. Or cette interprétation, qui implique que notre ignorance, le caractère grossier de nos

descriptions, seraient responsables du second principe et dès lors de la flèche du temps, est intenable. Elle nous force à conclure que le monde paraîtrait parfaitement symétrique dans le temps à un observateur bien informé, comme le démon imaginé par Maxwell, capable d'observer les microétats. Nous serions les pères du temps et non les enfants de l'évolution. Mais comment expliquer alors que les propriétés dissipatives, comme les coefficients de diffusion ou les temps de relaxation, soient bien définis, quelle que soit la précision de nos expériences ? Comment expliquer le rôle constructif de la flèche du temps que nous avons évoqué plus haut ? Page 29 et 30

[17]. M. Gell-Mann, *The Quark and the Jaguar*, Londres. Little Brown and Co, 1994, p. 218-220.

Remarque : quelle belle image... quel beau parfum de logique quasi raciste. Ce qui n'est pas pur est "contaminé"...

[...] Les développements récents de la physique et de la chimie de non équilibre montrent que la flèche du temps peut être une source d'ordre. Il en était déjà ainsi dans des cas classiques simples, comme la diffusion thermique. Bien sûr, les molécules, mettons d'hydrogène et d'azote au sein d'une boîte close, évolueront vers un mélange uniforme. Mais chauffons une partie de la boîte et refroidissons l'autre. Le système évolue alors vers un état stationnaire dans lequel la concentration de l'hydrogène est plus élevée dans la partie chaude et celle de l'azote dans la partie froide. L'entropie produite par le flux de chaleur, qui est un phénomène irréversible, détruit l'homogénéité du mélange. C'est donc un processus générateur d'ordre, un processus qui serait impossible sans le flux de chaleur. L'irréversibilité mène à la fois au désordre et à l'ordre. Page 31

Remarque : et même encore plus simples - merveilleusement simples - les "pots vibrants" utilisés dans l'industrie pour trier et mettre en ordre des pièces sont un autre exemple du fait qu'il suffit parfois d'injecter un peu d'énergie créer de l'ordre.

Retenons ici que nous pouvons affirmer aujourd'hui que c'est grâce aux processus irréversibles associés à la flèche du temps que la nature réalise ses structures les plus délicates et les plus complexes. La vie n'est possible que dans un univers loin de l'équilibre. Le développement remarquable de la physique et de la chimie de non-équilibre au cours de ces dernières décennies renforce donc les conclusions présentées dans *La Nouvelle Alliance* * : 1. Les processus irréversibles (associés à la flèche du temps) sont aussi réels que les processus réversibles décrits par les lois

traditionnelles de la physique ; ils ne peuvent pas s'interpréter comme des approximations des lois fondamentales. 2. Les processus irréversibles jouent un rôle constructif dans la nature. 3. L'irréversibilité exige une extension de la dynamique.
Page 32

[*] I. Prigogine et I. Stengers, *La Nouvelle Alliance*, Paris, Gallimard, 1979

Il y a deux siècles, Lagrange décrivait la mécanique analytique, où les lois du mouvement newtonien trouvaient leur formulation rigoureuse, comme une branche des mathématiques [18]. Aujourd'hui encore on parle souvent de "mécanique rationnelle", ce qui signifierait que les lois newtoniennes exprimeraient les lois de la "raison" et pourraient ainsi prétendre à une vérité immuable. Nous savons qu'il n'en est pas ainsi puisque nous avons vu naître la mécanique quantique et la relativité. Mais aujourd'hui c'est à la mécanique quantique que l'on est tenté d'attribuer une vérité absolue. Gell-Mann écrit dans *The Quark and the Jaguar* que "la mécanique quantique n'est pas, en elle-même une théorie ; c'est plutôt le cadre dans lequel doit entrer toute théorie physique contemporaine". En est-il vraiment ainsi ? Comme mon regretté ami Léon Rosenfeld ne cessait de le souligner, toute théorie est fondée sur des concepts physiques associés à des idéalizations qui rendent possible la formulation mathématique de ces théories ; c'est pourquoi "aucun concept physique n'est suffisamment défini sans que soient connues les limites de sa validité", limites provenant des idéalizations mêmes qui le fondent. Page 33

[18] J.-L. Lagrange, *Théorie des fonctions analytiques*, Paris, Imprimerie de la République 1796. [20] L. Rosenfeld, "Considérations non-philosophiques sur la causalité", in *Les Théories de la Causalité*, Paris, PUF, 1971, P137.

La différence entre systèmes stables et instables nous est familière. Prenons un pendule et étudions son mouvement en tenant compte de l'existence d'une friction. Supposons-le d'abord immobile à l'équilibre. On sait que son énergie potentielle y présente une valeur minimale. Une petite perturbation sera suivie par un retour à l'équilibre. L'état d'équilibre du pendule est stable. En revanche, si nous réussissons à faire tenir un crayon sur sa pointe, l'équilibre est instable. La moindre perturbation le fera tomber d'un côté ou de l'autre. Il y a une distinction fondamentale entre les mouvements stables et instables. En bref, les systèmes dynamiques stables sont ceux où de petites modifications des conditions initiales produisent de petits effets. Mais pour une classe très étendue de systèmes dynamiques, ces modifications s'amplifient au cours du temps. Les systèmes chaotiques sont un exemple extrême de systèmes instables car les trajectoires

correspondant à des conditions initiales aussi proches que l'on veut divergent de manière exponentielle au cours du temps. On parle alors de "sensibilité aux conditions initiales" telle que l'illustre la parabole bien connue de "l'effet papillon" : le battement des ailes d'un papillon dans le bassin amazonien peut affecter le temps qu'il fera aux Etats-Unis. Nous verrons des exemples de systèmes chaotiques aux chapitres III et IV. On parle souvent de "chaos déterministe". En effet, les équations de systèmes chaotiques sont déterministes comme le sont les lois de Newton. Et pourtant elles engendrent des comportements d'allure aléatoire ! Cette découverte surprenante a renouvelé la dynamique classique, jusque-là considérée comme un sujet clos.

Page 34 & 35

[...] A la fin du XIX^{ème} siècle seulement, Poincaré a montré que les problèmes sont fondamentalement différents selon qu'il s'agit d'un système dynamique stable ou non. Déjà le problème à trois corps [Le Soleil, la Terre et la Lune] entre dans la catégorie des systèmes instables. [...] Page 36

Au lieu de considérer un seul système, nous pouvons en étudier une collection, un "ensemble p", selon le terme utilisé depuis le travail pionnier de Gibbs et d'Einstein au début de ce siècle. Un ensemble est représenté par un nuage de points dans l'espace des phases. Ce nuage est décrit par une fonction $\rho(q,p,t)$ dont l'interprétation physique est simple : c'est la distribution de probabilité, qui décrit la densité des points du nuage au sein de l'espace des phases. Le cas particulier d'un seul système correspond alors à la situation où ρ a une valeur nulle partout dans l'espace des phases sauf en un point unique q_0, p_0 . Ce cas correspond à une forme spéciale de ρ : les fonctions qui ont la propriété de s'annuler partout sauf en un seul point noté x_0 sont appelées "fonctions de Dirac" $\Delta(x-x_0)$. Une telle fonction $\delta(x-x_0)$ est donc nulle pour tout point x différent de x_0 . Nous reviendrons sur les propriétés des fonctions delta par la suite. Soulignons d'ores et déjà qu'elles appartiennent à une classe de fonctions généralisées ou de distributions (à ne pas confondre avec les distributions de probabilité). Elles ont en effet des propriétés anormales par rapport aux fonctions régulières car lorsque $x=x_0$, la fonction $\delta(x-x_0)$ diverge, c'est-à-dire tend vers l'infini. Soulignons-le déjà, ce type de fonction ne peut être utilisé qu'en conjonction avec des fonctions régulières, les fonctions test $\phi(x)$. La nécessité d'introduire une fonction test jouera un rôle crucial dans l'extension de la dynamique que nous allons décrire. Bornons-nous à souligner l'inversion de perspective qui s'esquisse ici : alors que la description d'un

Le système individuel semble intuitivement la situation première, elle devient, lorsqu'on part des ensembles, un cas particulier, impliquant l'introduction d'une fonction delta aux propriétés singulières.

Page 37 & 38

Henri Poincaré fut tellement impressionné par ce succès de la théorie cinétique qu'il écrivit : "peut-être est-ce la théorie cinétique des gaz qui va prendre du développement et servir de modèles aux autres... La loi physique alors prendrait un aspect entièrement nouveau... elle prendrait le caractère d'une loi statistique" [21]. Nous le verrons, cet énoncé était prophétique. La notion de probabilité introduite empiriquement par Boltzmann a été un coup d'audace d'une très grande fécondité. Plus d'un siècle après, nous commençons à comprendre comment elle émerge de la dynamique à travers l'instabilité : celle-ci détruit l'équivalence entre le niveau individuel et le niveau statistique, si bien que les probabilités prennent alors une signification intrinsèque, irréductible à une interprétation en termes d'ignorance ou d'approximation. C'est ce que mon collègue B. Misra et moi avons souligné en introduisant l'expression "intrinsèquement aléatoire". Page 39

[21] . H. Poincaré, *La valeur de la science*, Paris, Flammarion, 1913, p. 210.

[...] la distribution de probabilité nous permet d'incorporer dans le cadre de la description dynamique la microstructure complexe de l'espace des phases. Elle contient donc une information additionnelle, qui est perdue dans la description des trajectoires individuelles. Comme nous le verrons au chapitre IV, c'est un point fondamental : la description probabiliste est plus riche que la description individuelle, qui pourtant a toujours été considérée comme la description fondamentale. C'est la raison pour laquelle nous obtiendrons au niveau des distributions de probabilité une description dynamique nouvelle permettant de prédire l'évolution de l'ensemble. Nous pouvons ainsi obtenir les échelles de temps caractéristiques correspondant à l'approche des fonctions de distribution vers l'équilibre, ce qui est impossible au niveau des trajectoires individuelles. L'équivalence entre le niveau individuel et le niveau statistique est bel et bien détruite. Nous parvenons, pour les distributions de probabilité, à des solutions nouvelles irréductibles, au sens où elles ne s'appliquent pas aux trajectoires individuelles. Les "lois du chaos" associées à une description régulière et prédictive des systèmes chaotiques se situent au niveau statistique. C'est ce que nous entendions lorsque nous parlions à la section précédente d'une "généralisation de la dynamique". Il s'agit d'une formulation de la dynamique au niveau statistique

qui n'a pas d'équivalent en termes de trajectoires. Cela nous conduit à une situation nouvelle. Les conditions initiales ne peuvent plus être assimilées à un point dans l'espace des phases, elles correspondent à une région décrite par une distribution de probabilité. Il s'agit donc d'une description non-locale. De plus, comme nous le verrons, la symétrie par rapport au temps est brisée car dans la formulation statistique le passé et le futur jouent des rôles différents. Bien sûr, lorsque l'on considère des systèmes stables, la description statistique se réduit à la description usuelle. On pourrait se demander pourquoi il a fallu tellement de temps pour arriver à une formulation des lois de la nature qui inclue l'irréversibilité et les probabilités. L'une des raisons en est certainement d'ordre idéologique : c'est le désir d'accéder à un point de vue quasi divin sur la nature. Que devient le démon de Laplace dans le monde que décrivent les lois du chaos ? Le chaos déterministe nous apprend qu'il ne pourrait prédire le futur que s'il connaissait l'état du monde avec une précision infinie. Mais on peut désormais aller plus loin car il existe une forme d'instabilité dynamique encore plus forte, telle que les trajectoires sont détruites quel que soit la précision de la description. Ce type d'instabilité est d'une importance fondamentale puisqu'il s'applique, comme nous le verrons, aussi bien à la dynamique classique qu'à la mécanique quantique. Il est central dans tout ce livre. Une fois de plus, notre point de départ est le travail fondamental d'Henri Poincaré à la fin du XIX^{ème} siècle [23]

Nous avons déjà vu que Poincaré avait établi une distinction fondamentale entre systèmes stables et systèmes instables. Mais il y a plus. Il a introduit la notion cruciale de "système dynamique non intégrable". Il a montré que la plupart des systèmes dynamiques étaient non intégrables. Il s'agissait de prime abord d'un résultat négatif, longtemps considéré comme un simple problème de technique mathématique. Pourtant comme nous allons le voir, ce résultat exprime la condition sine qua non à toute possibilité d'articuler de manière cohérente le langage de la dynamique à ce monde en devenir qui est le nôtre. Qu'est-ce en effet qu'un système intégrable au sens de Poincaré ? Tout système dynamique peut être caractérisé par une énergie cinétique, qui dépend de la seule vitesse des corps qui le composent, et par une énergie potentielle, qui dépend de l'interaction entre ces corps, c'est-à-dire de leurs distances relatives. Un cas particulièrement simple est celui de particules libres, dénuées d'interactions mutuelles. Dans ce cas, il n'y a pas d'énergie potentielle et le calcul de la trajectoire devient trivial. Un tel système est intégrable au sens de Poincaré. On peut montrer que tout système dynamique intégrable peut être représenté comme s'il était constitué de corps dépourvus d'interactions. Nous reviendrons au chapitre V sur le formalisme hamiltonien qui permet ce type de

transformation. Nous nous bornons ici à présenter la définition de l'intégrabilité énoncée par Poincaré : un système dynamique intégrable est un système dont on peut définir les variables de telle sorte que l'énergie potentielle soit éliminée, c'est-à-dire de telle sorte que son comportement devienne isomorphe à celui d'un système de particules libres sans interaction. Poincaré a montré qu'en général de telles variables ne peuvent pas être obtenues. Des lors, en général, les systèmes dynamiques sont non intégrables. Si la démonstration de Poincaré avait conduit à un résultat différent, s'il avait pu montrer que tous les systèmes dynamiques étaient intégrables, jeter un pont entre le monde dynamique et le monde des processus que nous observons aurait été exclu. Dans un monde isomorphe à un ensemble de corps sans interaction, il n'y a pas de place pour la flèche du temps ni pour l'auto-organisation, ni pour la vie. Mais Poincaré n'a pas seulement démontré que l'intégrabilité s'applique seulement à une classe réduite de systèmes dynamiques, il a identifié la raison du caractère exceptionnel de cette propriété : l'existence de résonance entre les degrés de liberté du système. Il a, ce faisant, identifié le problème à partir duquel une formulation élargie de la dynamique devient possible. La notion de résonance caractérise un rapport entre des fréquences. Un exemple simple de fréquence est celui de l'oscillateur harmonique, qui décrit le comportement d'une particule liée à un centre par une force proportionnelle à la distance : si on écarte la particule du centre, elle oscillera avec une fréquence bien définie. Considérons maintenant le cas le plus familier d'oscillateur, celui du ressort qui, éloigné de sa position d'équilibre, vibre avec une fréquence caractéristique. Soumettons un tel ressort à une force extérieure, caractérisée elle aussi par une fréquence que nous pouvons faire varier. Nous observons alors un phénomène de couplage entre deux fréquences. La résonance se produit lorsque les deux fréquences, celle du ressort et celle de la force extérieure, correspondent à un rapport numérique simple (l'une des fréquences est égale à un multiple entier de l'autre). L'amplitude de la vibration du pendule augmente alors considérablement. Le même phénomène se produit en musique, lorsque nous jouons une note sur un instrument. Nous entendons les harmoniques. La résonance "couple" les sons. Les fréquences, et en particulier la question de leur résonance, sont au cœur de la description des systèmes dynamiques. Chacun des degrés de liberté d'un système dynamique est caractérisé par une fréquence. La valeur des différentes fréquences dépend en général du point de l'espace des phases. Considérons un système à deux degrés de liberté, caractérisé par les fréquences ω_1 et ω_2 . Par définition, en chaque point de l'espace des phases où la somme $n_1\omega_1+n_2\omega_2$ s'annule pour des valeurs entières, non nulles de n_1 et n_2 nous avons résonance, car en un tel point $n_1/n_2=-\omega_2/\omega_1$. Or, le calcul de la trajectoire de tels systèmes fait intervenir des dénominateurs de type $1/(n_1\omega_1+n_2\omega_2)$, qui

divergent donc aux points de résonance, ce qui rend le calcul impossible. C'est le problème des petits diviseurs, déjà souligné par Le Verrier. Ce que Poincaré a montré, c'est que les résonances et les dénominateurs dangereux qui leur correspondent constituaient un obstacle incontournable s'opposant à l'intégration de la plupart des systèmes dynamiques. Poincaré avait compris que son résultat menait à ce qu'il appela "le problème général de la dynamique", mais ce problème fut longtemps négligé. Max Born a écrit : "Il serait vraiment remarquable que la Nature ait trouvé le moyen de résister au progrès de la connaissance en se cachant derrière le rempart des difficultés analytiques du problème à n-corps" [...] Pages 41 à 46

[21] H. Poincaré, "La valeur de la Science", Paris Flammarion, 1913, P210 [22] B Mandelbrot, "The Fractal Geometry of Nature", San Francisco, J.Wiley, 1982 [23] H. Poincaré, "Les méthodes nouvelles de la mécanique", Paris, Gauthier-Villars 1893 (Dover 1957).

Remarque : c'est une demi-explication car il resterait à savoir d'où vient le dit "point de vue divin". En fait, ce point de vue divin n'est pas celui de n'importe quelle religion. Par exemple, ce n'est pas celui du taoïsme, ni du bouddhisme, ni même de l'animisme. Le point de vue divin en question est le point de vue de dieux techniciens, soit Grecs, Hébreux ou dérivés [...]

Nous pouvons désormais aller au-delà du résultat négatif de Poincaré et montrer que la non-intégrabilité ouvre, comme les systèmes chaotiques, la voie à une formulation statistique des lois de la dynamique. Page 47

J'ai toujours pensé que la science était un dialogue avec la nature. Comme dans tout dialogue véritable les réponses sont souvent être inattendues. Pages 65.

Adolescent, j'étais fasciné par l'archéologie, la philosophie et la musique. [...] Les sujets qui intéressaient avaient toujours été ceux où le temps jouait un rôle essentiel, que ce soit l'émergence des civilisations, les problèmes éthiques associés à la liberté humaine ou l'organisation temporelle des sons en musique. Mais la menace de la guerre pesait et il semblait plus raisonnable que je me dirige vers une carrière dans les sciences "dures". C'est ainsi que j'entamai des études de Physique et de Chimie à l'Université libre de Bruxelles. Après tant d'années je ne peux pas me souvenir précisément de mes réactions, mais il me semble que j'ai ressorti étonnement et frustration. En physique, le temps était considéré comme un simple paramètre géométrique. Plus de cent ans avant Einstein et Minkowski, en 1796 déjà, Lagrange

avait baptisé la dynamique "une géométrie à 4 dimensions". Einstein affirmait que le temps associé à l'irréversibilité était une illusion. Étant donné mes premiers intérêts, c'était une conclusion qu'il m'était impossible d'accepter, mais même aujourd'hui la tradition d'un temps spatialisé reste toujours vivante. Page 66

Je ne suis certainement pas le premier à avoir senti que cette spatialisation du temps était incompatible tant avec l'univers évolutif que nous observons qu'avec notre expérience humaine. Ce fut d'ailleurs le point de départ du philosophe Henri Bergson, pour qui "le temps est invention où il n'est rien du tout". J'ai déjà cité l'article "le possible et le réel", une œuvre assez tardive puisque l'article fut écrit en 1930 à l'occasion de son prix Nobel Bergson y parle du temps comme "jaillissement effectif de nouveauté imprévisible" dont témoigne notre expérience de la liberté humaine mais aussi de l'indétermination des choses. En conséquence, le possible est plus riche que le réel. L'univers autour de nous doit être compris à partir du possible, non à partir d'un quelconque état initial dont il pourrait, de quelque manière, être déduit. Page 67.

Remarque : et même probablement, comme somme, comme intégrale des possibles

Comme l'a écrit le grand physicien A.S. Eddington : "dans toute tentative pour construire un pont entre les domaines d'expériences qui appartiennent aux dimensions spirituelles et aux dimensions physiques, le temps occupant la position cruciale". Page 68

Il me semblait que nier toute pertinence de la physique en ce qui concerne le temps était payer un prix trop élevé. Après tout, la science était un exemple unique de dialogue fructueux entre l'homme et la nature. N'était-ce pas parce que la science classique s'est cantonnée à l'étude de problèmes simples qu'elle a pu réduire le temps à un paramètre géométrique ? [...] Le temps ne serait-il pas une propriété émergente ? Mais il faut alors découvrir ses racines. Jamais la flèche du temps n'émergera d'un monde régi par des lois temporelles symétriques. J'ai acquis la conviction que irréversibilité macroscopique était l'expression d'un caractère aléatoire niveau microscopique. J'étais encore très loin des contributions résumées au chapitre précédent, où l'instabilité impose une reformulation des lois fondamentales classiques et quantiques, même au niveau microscopique. Page 69

Pour la grande majorité des scientifiques, la thermodynamique devrait se limiter de manière stricte à l'équilibre. Pour eux, l'irréversibilité associée à un temps unidirectionnel était une hérésie. Lewis alla jusqu'à écrire : "nous allons voir que

presque partout le physicien a purifié sa science de l'usage d'un temps unidirectionnel ... Étranger à idéal de la physique." Page 70

Après mon exposé, le plus grand expert en la matière fit le commentaire suivant : "je suis étonné que ce jeune homme soit tellement intéressé par la physique de non équilibre. Les processus irréversibles sont transitoires. Pourquoi alors ne pas attendre et étudier l'équilibre comme tout le monde ?" J'ai été tellement étonné que je n'ai pas eu la présence d'esprit de lui répondre : "Mais nous aussi nous sommes des êtres transitoires. N'est-il pas naturel de s'intéresser à notre condition humaine commune ?". J'ai ressenti toute ma visite l'hostilité que suscite chez les physiciens le temps unidirectionnel. [...] Partout autour de nous nous voyons l'émergence de structures, témoignage de la créativité de la nature pour utiliser le terme de Whitehead. J'étais persuadé que, d'une manière ou d'une autre, cette créativité était liée aux processus irréversibles.

Page 71

Contrairement aux systèmes soit à l'équilibre soit proches de l'équilibre, les systèmes loin de l'équilibre ne conduisent plus à un extremum d'une fonction telles que l'énergie libre ou la production d'entropie. En conséquence, il n'est plus certain que les fluctuations soient amorties. Il est seulement possible de formuler les conditions suffisantes de stabilité que nous avons baptisé "critère général d'évolution". Ce critère met en jeu le mécanisme des processus irréversibles dont le système est le siège. Alors qu'à l'équilibre et près de l'équilibre, les lois de la nature sont universelles, loin de l'équilibre elles deviennent spécifiques, elles dépendent du type de processus irréversibles. Cette observation est conforme à la variété des comportements de la matière que nous observons autour de nous. Loin de l'équilibre, la matière acquiert de nouvelles propriétés où les fluctuations, les instabilités jouent un rôle essentiel : la matière devient active. Page 74 - 75

La thermodynamique permet de formuler les conditions nécessaires à l'apparition de structures dissipatives en Chimie. Elles sont de deux types : Les structures dissipatives se produisant dans des conditions éloignées de l'équilibre, il y a toujours une distance critique en deçà de laquelle la branche thermodynamique est stable. Les structures dissipatives impliquent l'existence d'étapes catalytiques. Cela signifie qu'il existe dans la chaîne des réactions chimiques une étape dans laquelle un produit intermédiaire Y est obtenu à partir d'un produit intermédiaire X alors que dans une autre étape X est produit et à partir de Y. Ces conditions, remarquons-le, sont satisfaites par tous les organismes vivants. Les enzymes, qui sont codées

dans le matériel génétique, assurent une richesse et une multiplicité de réactions catalytiques sans équivalent dans le monde inorganique. Et sans elles, le matériel génétique resterait lettre morte.

Page 77

La réaction de Belousov-Zhabotinski constitue un exemple spectaculaire d'oscillations chimiques qui se produisent en phase liquide loin de l'équilibre. Je ne décrirai pas ici cette réaction. Je veux seulement évoquer notre émerveillement lorsque nous vîmes cette solution réactive devenir bleue, puis rouge, puis bleue à nouveau... Aujourd'hui, bien d'autres réactions oscillantes sont connues, mais la réaction de Belousov-Zhabotinski garde une importance historique. Elle a été la preuve que la matière loin de l'équilibre acquiert bel et bien de nouvelles propriétés. Des milliards de molécules évoluent ensemble et cette cohérence se manifeste par le changement de couleur de la solution. Cela signifie que des corrélations à longue portée apparaissent dans des conditions de non équilibre, des corrélations qui n'existent pas à l'équilibre. Sur un mode métaphorique, on peut dire qu'à l'équilibre la matière est aveugle, alors que loin de l'équilibre elle commence à voir. Et cette nouvelle propriété, cette sensibilité de la matière à elle-même et à son environnement, est liée à la dissipation associée aux processus irréversibles. Pages 77-78

L'homogénéité du temps (comme dans les oscillations chimiques), ou de l'espace (comme dans les structures de Turing), ou encore de l'espace et du temps simultanément (comme dans les ondes chimiques) est brisée. De même, les structures dissipatives se différencient intrinsèquement de leur environnement. Page 81

A propos des structures dissipatives, nous pouvons parler d'"auto organisation". Même si nous connaissons l'état initial du système, les processus donc il est le siège et les conditions aux limites, nous ne pouvons pas prévoir lequel des régimes d'activité ce système va choisir. Les bifurcations ne peuvent elles nous aider à comprendre l'innovation et la diversification dans d'autres domaines que la physique ou la chimie ? Page 81

L'activité humaine, créative et innovante, n'est pas étrangère à la nature. On peut la considérer comme une amplification et une intensification de traits déjà présents dans le monde physique, et que la découverte des processus loin de l'équilibre nous a appris à déchiffrer. Page 82

Rapport aux communautés européennes.

Dans un rapport récent aux Communautés européennes, C.K. Biebracher, G Nicolis et P. Schuster ont écrit : "Le maintien de l'organisation dans la nature n'est pas - et ne peut pas être - réalisé par une gestion centralisée, l'ordre ne peut être maintenu que par une auto-organisation. Les systèmes auto-organiseurs permettent l'adaptation aux circonstances environnementales ; par exemple, ils réagissent à des modifications de l'environnement grâce à une réponse thermodynamique qui les rend extraordinairement flexibles et robustes par rapport aux perturbations externes. Nous voulons souligner que la supériorité des systèmes auto-organiseurs par rapport à la technologie humaine habituelle qui évite soigneusement la complexité et gère de manière centralisée la grande majorité des processus techniques. Par exemple, en chimie synthétique les différentes étapes réactionnelles sont soigneusement séparées les unes des autres, et les contributions liées à la diffusion des réactifs sont évitées par brassage. Une technologie entièrement nouvelle devra être développée pour exploiter le grand potentiel d'idées et de règles des systèmes auto-organiseurs en matière de processus technologiques. La supériorité des systèmes auto-organiseurs est illustrée par les systèmes biologiques où des produits complexes sont formés avec une précision, une efficacité, une vitesse sans égale". La Fin des Certitudes Pages 82 & 83

C.K. Biebracher, G Nicolis et P. Schuster , Self Organisation in the Physico-Chemical and Life sciences, Report EUR 16546, European Commission 1995.

La nature nous présente en effet l'image de la création, de l'imprévisible nouveauté. Notre univers a suivi un chemin de bifurcations successives : il aurait pu en suivre d'autres. Peut-être pouvons-nous en dire autant pour la vie de chacun d'entre nous. Page 83

L'existence d'une flèche du temps n'est pas une question de convenance. C'est un fait imposé par l'observation. Page 86

L'application de Bernouilli introduit dès le départ une direction privilégiée du temps. Si nous prenons l'application inverse, nous obtenons un point attracteur unique, vers lequel convergent toutes les trajectoires quelle que soit la condition initiale. Voici la symétrie du temps est déjà brisée au niveau de l'équation du mouvement. La notion trajectoire n'est un mode de représentation adéquat que si la trajectoire reste à peu près la même lorsque nous modifions légèrement les conditions initiales. Les questions que nous formulons en physique doivent recevoir

une réponse robuste, qui résiste à l'à peu près. La description en termes de trajectoires n'a pas ce caractère robuste. C'est la signification de la sensibilité aux conditions initiales. Au contraire, la description statistique ne présente pas cette difficulté. C'est donc à ce niveau statistique que nous devons formuler les lois du chaos et c'est également à ce niveau que l'opérateur de Perron-Frobenius admet de nouvelles solutions. Page 105

Les systèmes non intégrables de Poincaré seront ici d'une importance considérable. Dans ce cas, la rupture entre la description individuelle (trajectoire ou fonction d'onde) et la description statistique sera encore plus spectaculaire. Avait comme nous le verrons, pour de tels systèmes, le démon de Laplace reste impuissant, quelle que soit sa connaissance, finie ou même infinie, Le futur n'est plus donné. Il devient, comme l'avait prédit le poète Paul Valéry, "une construction". Page 124

La non-intégrabilité est due aux résonnances. Or, les résonnances expriment des conditions qui doivent être satisfaites par les fréquences : elles ne sont pas des événements locaux qui se produisent à un instant donné. Elles introduisent donc un élément étranger à la notion de trajectoire, qui correspond à une description locale d'espace-temps. Page 127

La physique de l'équilibre nous a donc inspiré une fausse image de la matière. Nous retrouvons maintenant la signification dynamique de ce que nous avons constaté au niveau phénomène logique : la matière à l'équilibre est aveugle et, dans les situations de non équilibre, elle commence à voir. Page 149

C'est parce que, selon les termes d'Heisenberg, nous sommes à la fois "acteurs" et "spectateurs" que nous pouvons apprendre quelque chose de la nature. Cette communication, cependant, exige un temps commun. C'est ce temps commun qu'introduit notre approche tant en mécanique quantique que classique. (...) La direction du temps est commune à l'appareil de mesure et à l'observateur. Il n'est plus nécessaire d'introduire une référence spécifique à la mesure dans l'interprétation du formalisme. [...] Dans notre approche, l'observateur et ses mesures ne jouent plus un rôle actif dans l'évolution des systèmes quantiques, en tous cas, pas plus qu'en mécanique classique. Dans les deux cas nous transformons en action l'information que nous recevons du monde environnant. Mais ce rôle, s'il est important à l'échelle humaine, n'a rien à voir avec celui de démiurge que la théorie quantique traditionnelle assignait à l'homme, considéré comme responsable de l'actualisation des potentialités de la nature. En ce sens, notre approche restaure

le sens commun. Elle élimine les traits anthropocentriques implicites dans la formulation traditionnelle de la théorie quantique. Page 175

La science est un dialogue avec la nature. Mais comment un tel dialogue est-il possible ? Un monde symétrique par rapport au temps serait un monde inconnaissable. Toute prise de mesure, préalable à la création de connaissance, présuppose la possibilité d'être affectés par le monde, que ce soit nous qui soyons affectés ou nos instruments. Mais la connaissance ne présuppose pas seulement un lien entre celui qui connaît et ce qui est connu, elle exige que ce lien crée une différence entre passé et futur. La réalité du devenir est la condition sine qua non à notre dialogue avec la nature. Page 177

Comprendre la nature a été l'un des grands projets de la pensée occidentale. Il ne doit pas être identifié avec celui de contrôler la nature. Aveugle serait le maître qui croirait comprendre ses esclaves sous prétexte que ceux-ci obéissent à ses ordres. Bien sûr, lorsque nous nous adressons à la nature, nous savons qu'il ne s'agit pas de la comprendre à la manière dont nous comprenons un animal ou un homme. Mais là aussi la conviction de Nabokov s'applique : "ce qui peut être contrôlé n'est jamais tout à fait réel, ce qui est réel ne peut jamais être rigoureusement contrôlé." Pages 177 & 178

Le déterminisme a des racines anciennes dans la pensée humaine, et il a été associé aussi bien à la sagesse, à la sérénité qu'au doute et au désespoir. La négation du temps, l'accès à une vision qui échapperait à la douleur du changement, est un enseignement mystique. Mais la réversibilité du changement n'avait, elle, été pensée par personne : "Aucune spéculation, aucun savoir n'a jamais affirmé l'équivalence entre ce qui se fait et ce qui se défait, entre une plante qui pousse, fleurit et meurt, et une plante qui ressuscite, rajeunit et retourne vers sa graine primitive, entre un homme qui mûrit et apprend, et un homme qui devient progressivement enfant, puis embryon, puis cellule." Page 178

A quelque niveau que ce soit, la physique et les autres sciences confirment notre expérience de la réalité : nous vivons dans un univers en évolution. [...] La dernière forteresse qui résistait à cette affirmation vient de céder. Nous sommes maintenant en mesure de déchirer le message de l'évolution tel qu'il prend racine dans les lois fondamentales de la physique. Nous sommes désormais en mesure de déchiffrer sa signification en termes d'instabilité associée au chaos déterministe et à la non-intégrabilité. Le résultat de notre recherche est en effet l'identification de systèmes qui imposent une rupture de l'équivalence entre la description individuelle

(trajectoires, fonctions d'onde) et la description statistique d'ensembles. Et c'est au niveau statistique que l'instabilité peut être incorporée dans les lois fondamentales. Les lois de la nature acquièrent alors une signification nouvelle : elles ne traitent plus de certitudes mais de possibilités. Elles affirment le devenir et non plus seulement l'être. Elles décrivent un monde de mouvements irréguliers, chaotiques, un monde plus proche de celui qu'imaginaient les atomistes anciens que des orbites newtoniennes. Page 179

VI. Ordre par fluctuations

Un temps réversible au niveau de chaque composant d'un système complexe, irréversible et bifurquant au niveau des systèmes entiers.

Notion de fluctuation

Nous illustrerons ce problème en utilisant l'exemple de N boules à répartir dans deux cases identiques par jet au hasard. Au terme d'un grand nombre de jets on sait que le nombre de boules moyen arrivées dans l'une des deux cases X , et que plus N est grand, plus X tend vers $\langle N \rangle = N/2$. Si l'on reproduit l'expérience la moyenne $\langle X \rangle$ des valeurs de X sera d'autant plus proche de $N/2$. Cependant, pour chaque jet on observe par rapport à cette moyenne un écart est défini par la variance V , qui vaut :

$$V = \langle (X - N/2)^2 \rangle$$

Ainsi les fluctuations sont données par :

$$\sigma / \langle X \rangle = \sqrt{\langle (X - N/2)^2 \rangle / \langle X \rangle^2} \propto 1 / \sqrt{N}$$

qui tend vers 0 quand N est grand.

Ces lois ne peuvent permettre de comprendre des phénomènes tels que celui de la construction d'une termitière par exemple, bien que le comportement de chaque animal, pris individuellement semble être tout à fait aléatoire. La termitière est un ensemble de boulettes de terre déposées pour former une architecture très complexe. On a en fait ici un dépôt simultané d'hormones, qui contiennent des informations, typiques du comportement des insectes sociaux.

Fluctuations-bifurcations

Si elle atteint une certaine taille critique, on montre que la fluctuation peut se développer et envahir tout le système. Il y a bifurcation alors du comportement du système.

Ce type de comportement apparaît lors des phénomènes de changement d'état, qui nécessitent une nucléation. C'est le cas de la transformation d'une masse de vapeur d'eau en liquide par exemple, ou d'eau en glace. C'est le cas aussi de la croissance cristalline. La longueur de corrélation caractéristique du phénomène tend vers l'infini dès lors qu'on a dépassé un certain point critique. La vitesse de propagation de l'information joue ici un rôle essentiel. Les phénomènes qui se produisent sont

imprévisibles, impossibles selon les lois de la statistique. Ce sont des phénomènes irréversibles.

VII. Histoire du développement des connaissances sur la lumière

(En cours de rédaction)

Les concepts d'espace et de temps ont ensuite été profondément modifiés par le développement des connaissances sur la nature de la lumière. Il est donc nécessaire à ce stade de passer par une présentation historique de concept de lumière.

Une des toutes premières questions qui se sont posées au sujet de la lumière est celle de sa vitesse de propagation. Une vitesse ne se définissant que relativement à une référence, il était donc nécessaire d'aborder le sujet par le biais d'un questionnement sur ce qu'est le mouvement et sur sa caractérisation, donc la définition du repère de coordonnées dans lequel on choisit de le décrire. Il s'agit donc d'un problème primitivement de mécanique.

I. Le mouvement

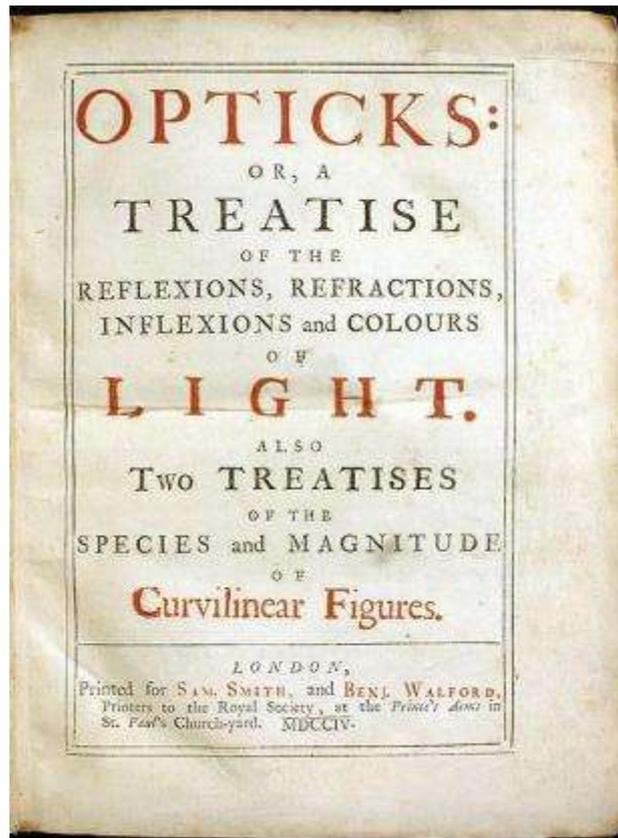
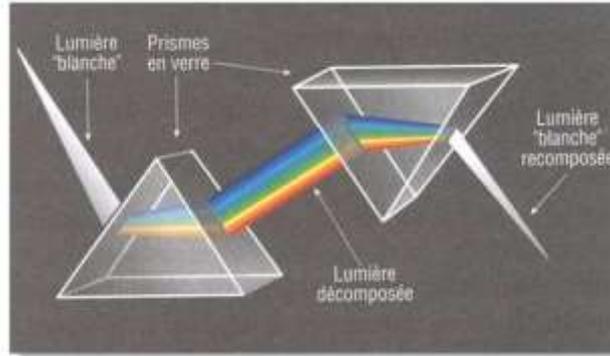
II. La controverse Newton –Huygens sur la nature de la lumière

L'une des premières questions qui se sont posées sur la lumière est celle de sa vitesse. Galilée l'a exprimé avec clarté dans son *Discours sur deux nouvelles sciences* par un dialogue entre Simplicio, Salviati et leur Professeur Sagrédo⁵³. Il a bien perçu l'aspect propagatif du phénomène, sans pouvoir proposer une valeur de la vitesse. Il faudra attendre quelques de deux cent cinquante ans, avec les expériences de Fizeau, pour disposer d'une bonne évaluation de cette vitesse.

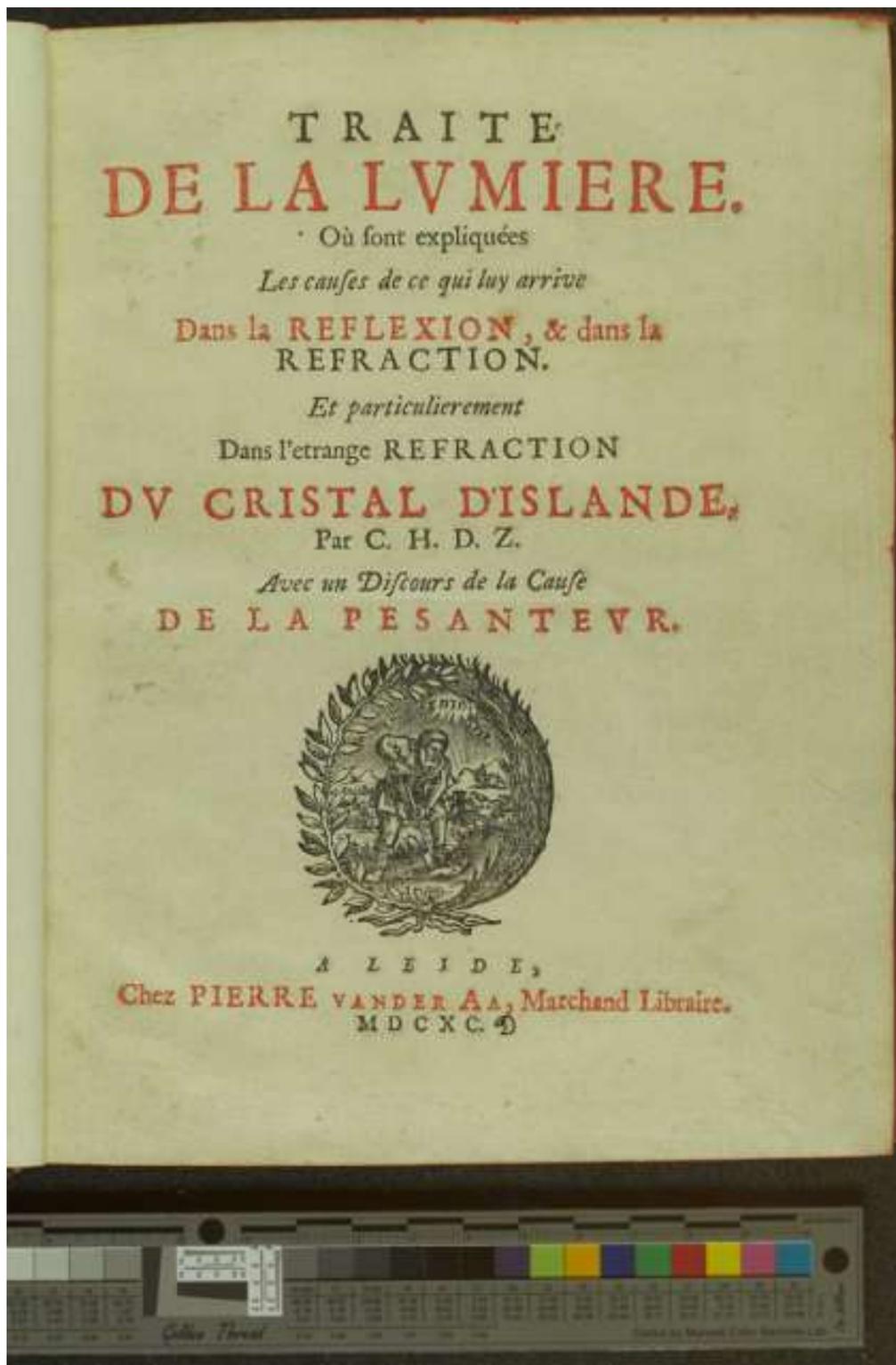
Newton : théorie corpusculaire

Huygens : théorie ondulatoire

⁵³ Le *Dialogue* se déroule à [Venise](#) sur quatre journées entre trois interlocuteurs : Filippo Salviati, astronome Florentin, ami et porte-parole de Galilée, il défend le système héliocentrique de Copernic combattu par l'église et la nouvelle physique de Galilée, Giovan Francesco Sagredo, un mathématicien Vénitien éclairé mais sans a priori, et Simplicio, un défenseur du système géocentrique de Ptolémée de la physique aristotélicienne, un personnage dans lequel Urbain VIII se serait reconnu². Le nom de Simplicio renvoi aussi aux mots semplice « simple » et sempliciotto de l'italien « simplet ». Mais, lorsqu'on lui reprocha le caractère ostensiblement péjoratif de Simplicio, Galilée répondit qu'il s'agissait de Simplicius de Cilicie.



Newton 1704



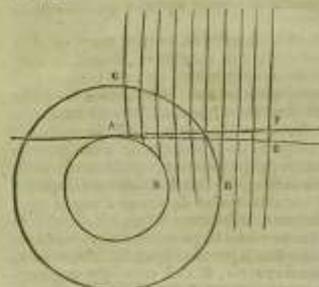
Traite de la Lumière de Christian Huygens (1690)



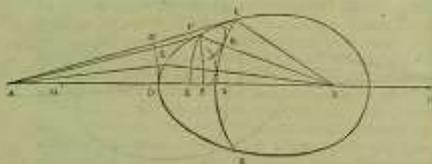
approchent de ces deux extremes. Ce qui estant, il n'en suit
nécessairement que toute ligne, qui coupe une de ces ondes à
angles droits, passe au dessus du point a, si ce n'est la seule qui
est perpendiculaire à l'horizon.

Soit s c l'arc qui porte la lumière au spectateur qui est
en s, & que b d soit la droite qui coupe cette onde perpen-
diculairement. Or parce que le rayon on la ligne droite, par
laquelle nous jugeons l'endroit où l'objet nous paroît, n'est
autre chose que la perpendiculaire à l'onde, qui arrive à nos-
tre oeil, comme l'on peut entendre par ce qui a été dit
cy dessus, il est manifeste que le point a s'apercevra com-
me estant dans la droite b d, & aussi plus haut qu'il n'est
en effet.

De même si la Terre est a b, & l'extremite de l'Atmosphère
c d :



bien terminée, puisque nous savons que l'air se raréfie à mesure qu'on y monte plus haut, parce qu'il en a d'au-
tant moins au dessus de luy qui le presse, les ondes de la
lumière du so-
leil venant, par
exemple, en
forte que, tant
qu'elles n'ont
pas atteint l'Atmosphère c d, la droite a e les coupe perpen-
diculairement ces mêmes ondes, entrant dans l'Atmosphère, doi-
vent avancer plus vite aux endroits élevez que dans ceux qui
sont plus près de la Terre. De sorte que si c e est l'onde qui
porte la lumière au spectateur en a, son endroit o sera le plus
avancé; & la droite a e, qui coupe cette onde à angles droits, &
qui détermine le lieu apparent du Soleil, passera au dessus du
Soleil véritable, qui seroit vu par la ligne a b. Et ainsi il peut
arriver que ne devant point être visible sans vapeurs, parce
que la ligne a e rencontre la surface de la Terre, il s'apercevra
par la refraction dans la ligne a f. Mais cet angle a e f n'est jamais
peut plus grand que d'un demi degré, parce que la terminée des
vapeurs n'altère que bien peu les ondes de la lumière. De plus
ces refractions ne sont pas tout à fait constantes, en tout temps,
F 3. fin

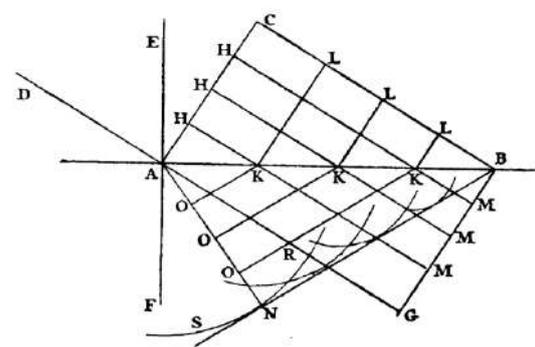
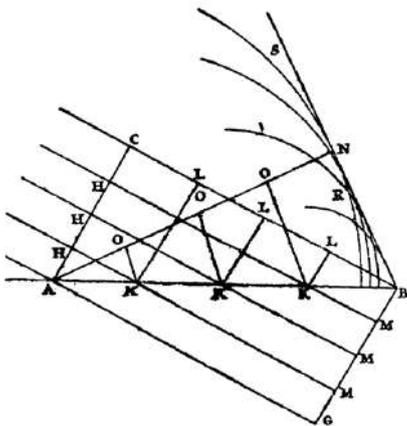


à j de c s, elle représen-
tera le temps par c s dans
le diaphane, & par consé-
quent toute la a n sera
aussi le temps par a e,
c u. D'où il paroît que le
temps par a c, c u, est
égal au temps par a d,
d e. Et l'on fera voir de
même, si i & k sont d'au-
tres points dans la courbe c d e, que les temps par a i, i s, &
par a k, k s sont toujours représentez par la ligne a t, & par-
tant égaux au dit temps par a d, d e.

Pour demander ensuite que les surfaces, que ces coté-
tes serent par leur circonvolution, dirigeront tous les rayons
qui viennent sur elles du point a, en sorte qu'ils tendent vers n,
soit supposé le point a dans la courbe, plus loin de d que n'est c,
mais en sorte que la droite a n tombe sur la courbe, qui sert
à la

à la refraction, en dehors, & du centre s soit décrit l'arc a s, cou-
pant d e en s, & la droite c s en s, & du centre a l'arc d e, ren-
contrant a x en e.
Puisque les sommes des temps par a x, x s, & par a e,
c s sont égales, si le de la première somme l'on ôte le temps
par a s, & de l'autre le temps par x s, il restera le temps par
a e égal au temps par ces deux, a c, c s. Partant dans le temps
que la lumière est venue par a s, elle sera aussi venue par a c, &
de plus il se fera fait une onde spherique particulière dans le dia-
phane, du centre c, & dont le demidiame sera égal à c s, la-
quelle onde touchera nécessairement la circonférence e s en s,
puisque c s coupe cette circonférence à angles droits. De mé-
me ayant pris quelque autre point i, dans la courbe, l'on mon-
tra que dans le même temps du passage de la lumière par a s,
elle sera aussi venue par a i, & que de plus il se fera fait une
onde particulière du centre e, qui touchera la même circonfé-
rence s s. Et ainsi de tous les autres points de la courbe c d e.
Donc, au moment que la lumière sera arrivée en s, l'arc a s s
terminera le mouvement qui s'est répandu de a sur a c s. Et ainsi
ce même arc sera, dans le diaphane, la propagation de l'onde é-
manée du point a, laquelle onde on se peut représenter par l'arc
d e, ou par quelque autre plus près du centre a. Mais tous les en-
droits de l'arc a s sont en sorte étendus suivant des droites qui
luy sont perpendiculaires, c'est-à-dire qui tendent au centre s
(car cela se démontre de même que nous avons prouvé cy des-
sus que les droites des ondes spheriques s'étendent suivant des
droites qui viennent de leur centre) & ces progrès des endroits
des ondes sont les rayons mêmes de lumière. Il paroît donc que
tous ces rayons tendent icy au point s.
On pourroit aussi trouver le point e & tous les autres,
dans cette courbe qui sert à la refraction, en divisant d a
en o en sorte que d o soit i de n a, & décrivant du centre o
quel-

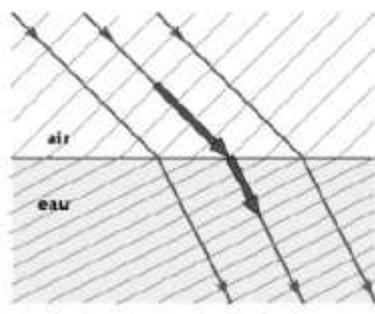
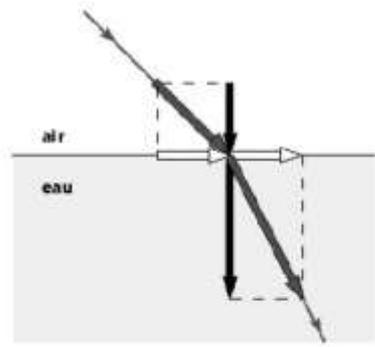
Huygens explique la réflexion et la réfraction



- Les plans d'onde incidents équidistants AC et KL atteignent la surface de séparation des deux milieux en des points également équidistants AKKK, qui émettent des ondes sphériques, lesquelles se propagent avec la même vitesse que la lumière incidente ; l'enveloppe de ces ondes est un plan d'onde réfléchi.
- Les plans d'onde incidents équidistants AC et KL atteignent la surface de séparation des deux milieux en des points également équidistants AKKK, qui émettent des ondes sphériques, lesquelles se propagent dans le milieu dense avec une vitesse plus faible que dans le milieu ténu ; l'enveloppe de ces ondes est un plan d'onde réfracté.

La réfraction selon Newton et Huygens

- Pour Newton, la vitesse des particules doit augmenter quand on pénètre dans un milieu plus dense
- Pour Huygens, au contraire, la vitesse des ondes est plus faible dans le milieu plus dense



« La lumière doit avoir une vitesse finie »

Pour Newton : « il y a une force qui accélère la lumière à l'entrée du milieu plus dense, donc la vitesse de la lumière y est plus grande »

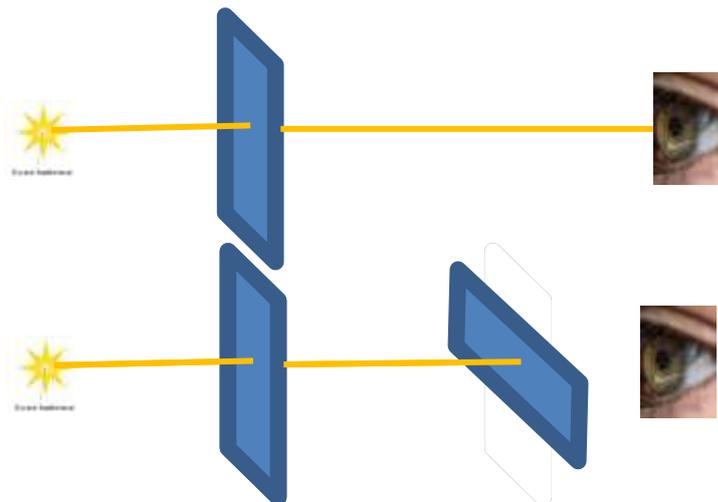
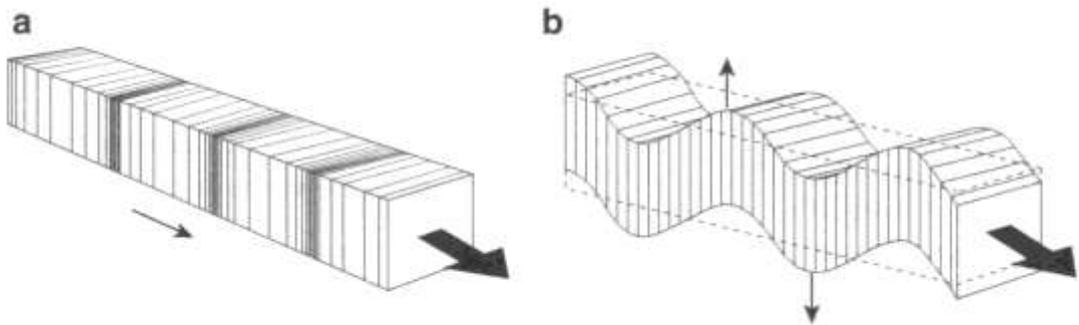
$$c_{eau} = c_{air} + \frac{F}{m} dt = c_{air} + \frac{\partial c}{\partial t} dt > c_{air}$$

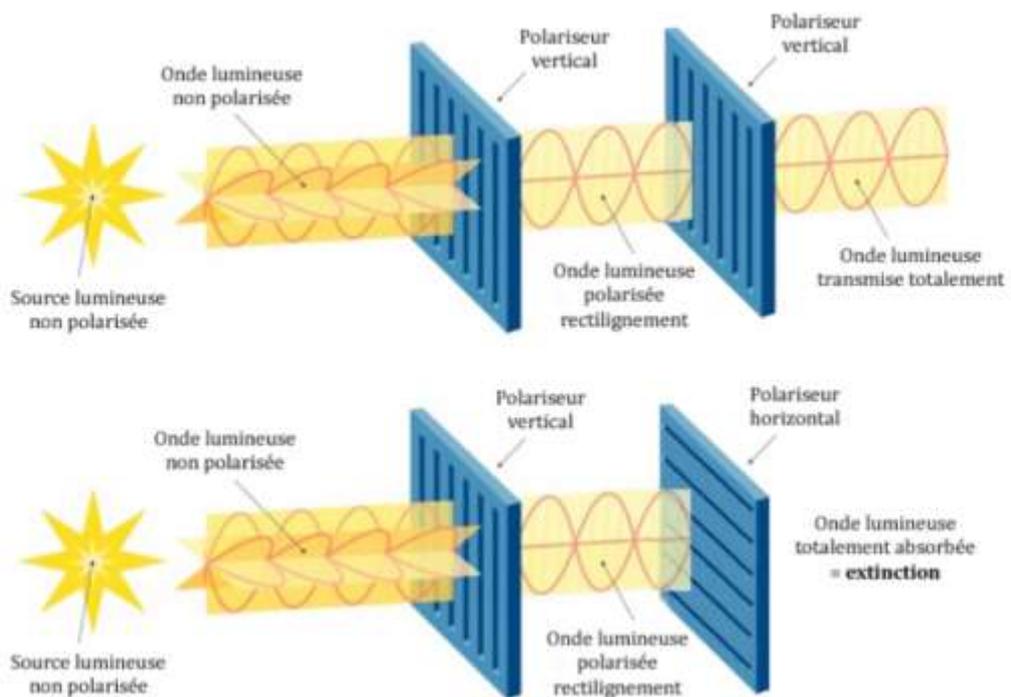
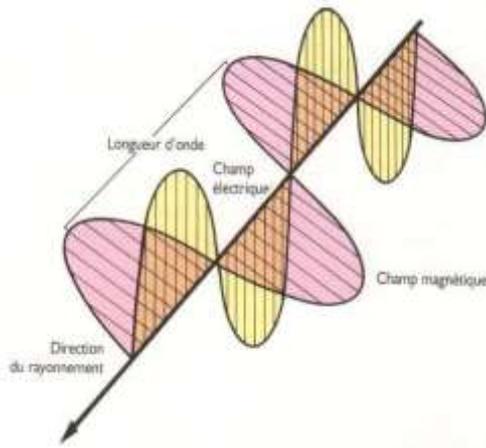
Pour Huygens : « la longueur d'onde dans le milieu plus dense doit être plus petite, donc la vitesse de la lumière y est plus faible »

$$c_{eau} = \frac{\lambda_{eau}}{T} < \frac{\lambda_{air}}{T} = c_{air}$$

III. La théorie ondulatoire de la lumière

- 1) Qu'est-ce qu'une onde
- 2) Les ondes lumineuses : transversales ou longitudinales ?





3) « *L'éther lumineux* », est introduit par Huygens, comme milieu indispensable à la propagation de ses ondes de lumière. L'éther du point de vue mécanique.

IV. Systèmes de référence

A. Système d'inertie

B. La chute des corps sur Terre : la verticalité est une approximation qui ne prend pas en compte le fait que la Terre n'est pas un système d'inertie

V. L'électromagnétisme

Les équations de Maxwell :

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Où :

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \epsilon \vec{E}$$

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{J})$$

$$\vec{J} = \gamma \vec{E}$$

Rappels : $\operatorname{rot} \vec{A} = \vec{\nabla} \wedge \vec{A}$ et $\operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{A} = \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{A}) - \Delta \vec{A}$

D'où il vient, par exemple dans le vide :

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{E} &= -\vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) + \Delta \vec{E} = -\frac{\partial \operatorname{rot} \vec{B}}{\partial t} \\ -\vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) + \Delta \vec{E} &= -\overrightarrow{\operatorname{grad}} \operatorname{div} \vec{E} + \Delta \vec{E} = -\frac{\partial \operatorname{rot} \vec{B}}{\partial t} = -\mu_0 \frac{\partial \operatorname{rot} \vec{H}}{\partial t} \end{aligned}$$

Soit :
$$\Delta \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \operatorname{rot} \vec{H}}{\partial t} = -\mu_0 \frac{\partial^2 \vec{D}}{\partial t^2} = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

Il reste alors :

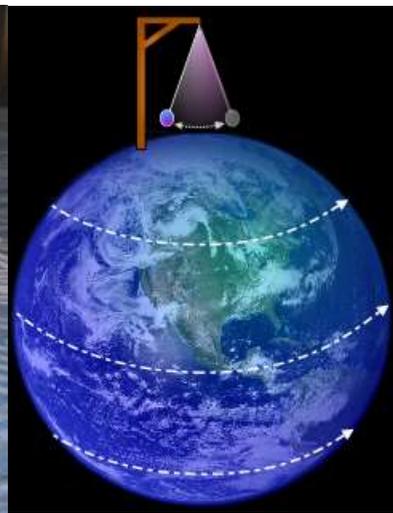
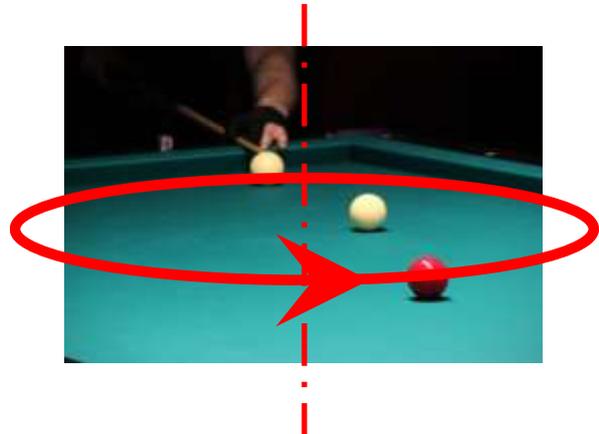
$$\Delta \vec{E} = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

Qui est une équation de propagation du champ électrique \vec{E} à la vitesse

$$\frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

VI. Ether et mouvement

rrr



pendule de Foucault-Panthéon de Paris

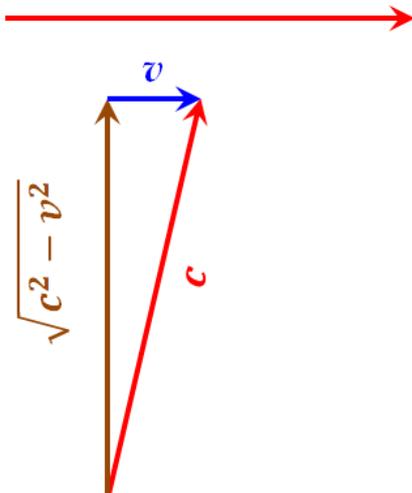


Deux possibilités

- 1) L'éther est entraîné par la source : donc le déplacement de la source par rapport à l'observateur (vitesse v) doit affecter la vitesse de la lumière détectée par l'observateur. Cette hypothèse est contredite par l'observation des étoiles doubles qui montre que les rayons lumineux qui proviennent de l'étoile qui s'éloigne, comme de celle qui se rapproche, nous arrivent à la même vitesse c . Donc l'éther « pénètre » tout l'univers, y compris la matière, et se présente comme un système de référence immobile dans l'absolu et par rapport auquel tout est en mouvement. Ceci est contradictoire avec le principe d'inertie et du mouvement relatif.
- 2) L'éther est immobile et l'observateur s'y déplace : l'expérience de Michelson et Morley devrait alors permettre de mettre en évidence ce mouvement en détectant un phénomène d'interférence : il n'en est rien.



Vitesse de la lumière dans l'éther : c



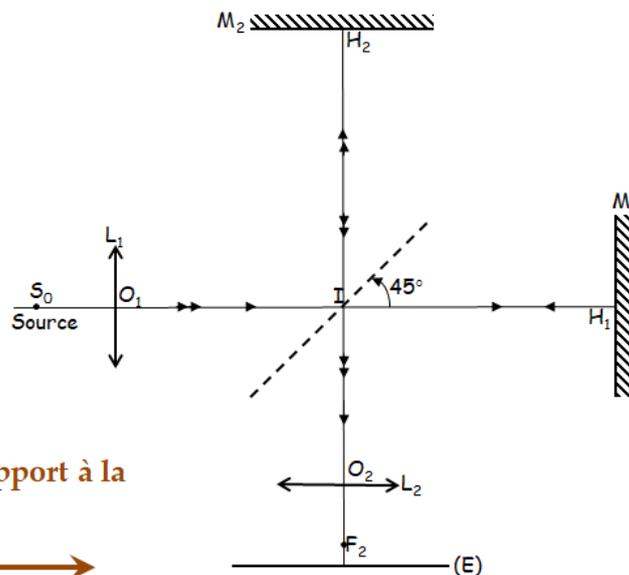
vitesse de la lumière par rapport à la Terre : $C + v$



vitesse de la lumière par rapport à la Terre : $C - v$

Déplacement de la Terre dans l'éther :

$v = 30 \text{ km/sec}$



Vitesse de la lumière dans l'éther : c

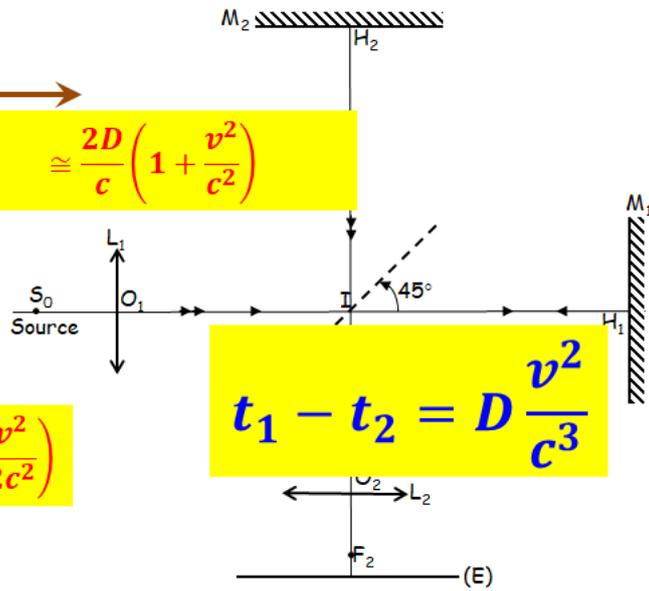


Déplacement de la Terre dans l'éther :

$v = 30 \text{ km/sec}$

$$t_1 = \frac{D}{c+v} + \frac{D}{c-v} = \frac{2Dc}{c^2 - v^2} \cong \frac{2D}{c} \left(1 + \frac{v^2}{c^2} \right)$$

$$t_2 = 2 \frac{D}{\sqrt{c^2 - v^2}} \cong \frac{2D}{c} \left(1 + \frac{v^2}{2c^2} \right)$$



$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q \vec{r}}{r^2}$

$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$

Maxwell

Connu de par les travaux de Coulomb

Connu de par les travaux d'Ampère

$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0 I}{4\pi c} \oint \frac{d\vec{l} \wedge \vec{r}}{r^3}$

The agreement of the results seems to show that light is a perturbation of the electromagnetic field according to electromagnetic laws

$$\frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

Einstein décide donc de se passer de l'éther, affirme qu'il n'existe pas et retient les deux postulats suivants :

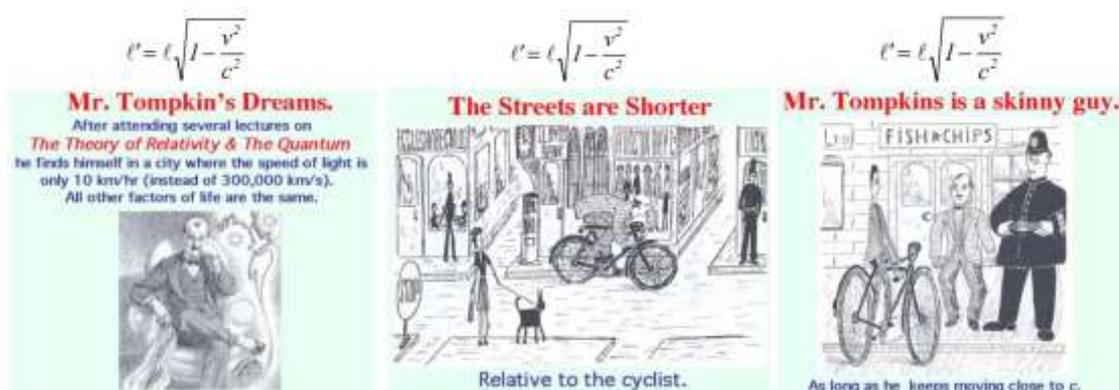
- i) Le principe de relativité galiléenne : dans deux systèmes de référence en translation rectiligne et uniforme l'un par rapport à l'autre les lois du mouvement s'expriment sous la même forme
- ii) La vitesse de la lumière dans l'espace vide est toujours la même, elle est indépendante du mouvement de la source ou du récepteur. Il s'en suit que cette vitesse ne peut être dépassée.

En fait la théorie de l'électromagnétisme de Maxwell donne des arguments essentiels qui imposent la conclusion d'Einstein. En effet, il n'y a aucune raison de penser que la vitesse de la lumière, qui apparaît dans les équations de Maxwell, soit la vitesse par rapport à la Terre, pas plus que par rapport à un milieu non détecté jusqu'alors et qui remplirait tout l'espace (l'éther lumineux ou éther).

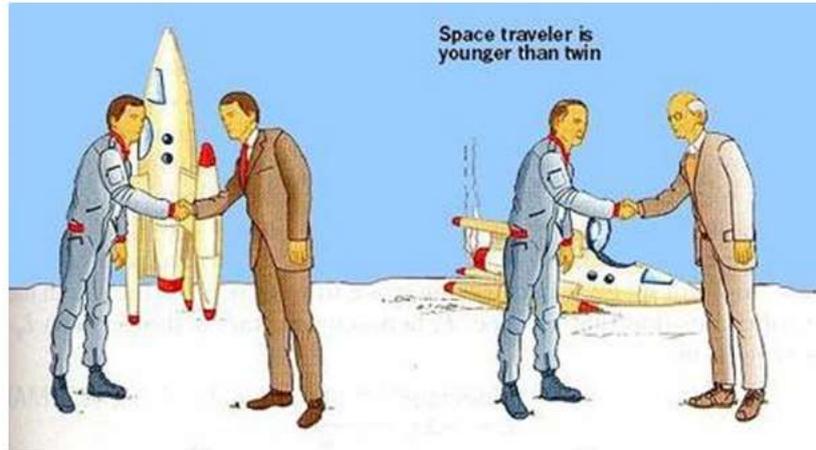
VII. Les transformations de Lorentz

Les deux postulats ci-dessus amènent immédiatement aux transformations de Lorentz

$$t' = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$



$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$



Galilée opposait à la lettre de l'ancien testament le déchiffrement du livre de la nature divinement écrit en langage mathématique.

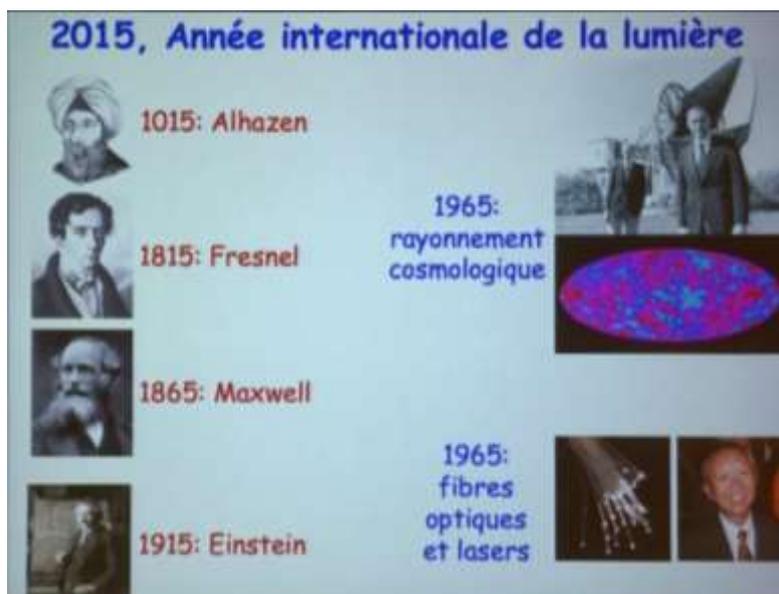


Image due à Serge Haroche ⁵⁴

⁵⁴ Colloque de rentrée du Collège de France, 15-16 octobre 2015, *Lumière, lumières*, <https://www.college-de-france.fr/site/colloque-2015/index.htm>

VIII. Les deux grandes révolutions scientifiques du XX^{ème} siècle : la relativité, la mécanique quantique

La synthèse de la dynamique classique et du champ électromagnétique responsable de la propagation des ondes lumineuses amène à distinguer deux classes de vitesses : celles qui sont proches de la vitesse de la lumière c et celles qui ne le sont pas. Le comportement des corps physiques est différent dans ces deux cas.

En mécanique au sens large il en sera de même pour le comportement des corps selon que la valeur de leur action est de l'ordre de la constante de Planck h ou qu'elle est beaucoup plus grande.

Ces constantes universelles c et h détruisent l'homogénéité du monde en y introduisant une échelle physique en fonction de laquelle les comportements se différencient qualitativement.

i. La relativité

Albert Einstein (1879-1955)

« La théorie d'Einstein nous dit que le fameux « passage du temps », source de mélancolie pour tant de poètes, est une illusion que nous devons sans doute au caractère irréversible de notre mise en mémoire. [...]

L'ensemble des lignes d'espace-temps représentant la structure et l'évolution du système nerveux humain offre, du fait de l'absence d'équilibre thermodynamique et de l'accumulation d'informations, une dissymétrie entre le « bas » (de l'espace-temps) et le « haut ». Cette dissymétrie serait la racine de la sensation illusoire d'un écoulement temporel. »

Thibault Damour.

*Entretiens sur la multitude du monde*⁵⁵



La célèbre horloge de Berne qui a inspiré le jeune Einstein dans ses réflexions sur le temps © RF

« Le bon Dieu n'a pas de montre ». On raconte que le jeune Einstein réveilla un jour son ami Michele Besso au petit matin pour lui faire part de cette grande révélation. C'était à Berne. C'était la fin du grand battement cosmique, l'effondrement du temps absolu.

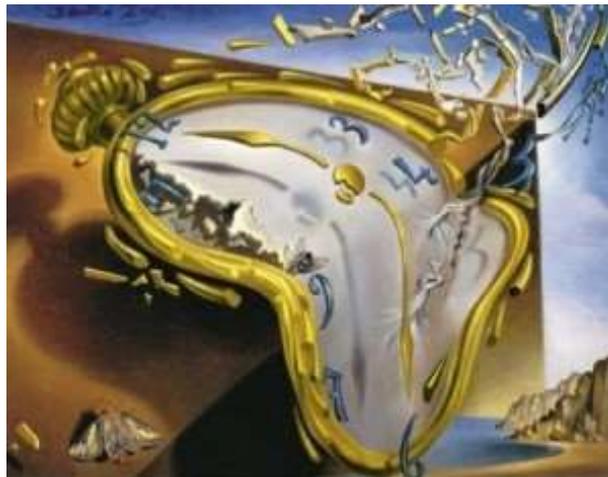
⁵⁵ Thibault Damour & Jean-Claude Carrière, *Entretiens sur la multitude du monde*, Editions Odile Jacob, 2002

Le fait que la vitesse de la lumière soit une limite maximum indépassable a pour conséquence que l'on ne peut plus parler de simultanéité absolue entre deux évènements.

La relativité restreinte est la synthèse de la dynamique (mécanique classique) et de la théorie du champ électromagnétique responsable de la propagation des ondes lumineuse.

Cette théorie, basée d'une part le postulat que les lois de la nature doivent s'écrire de la même façon dans tout système d'inertie et d'autre part que la vitesse de la lumière doit être la même quel que soit le système de coordonnées depuis lequel on la mesure aboutit aux transformations des coordonnées d'espace et de temps qui ne sont plus celles de Galilée, mais celles dites de Lorentz :

$$t' = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$



Coordonnées d'espace et de temps se correspondent en passant d'un système de coordonnées à un autre d'une manière contrôlée par la vitesse relative de ces deux système

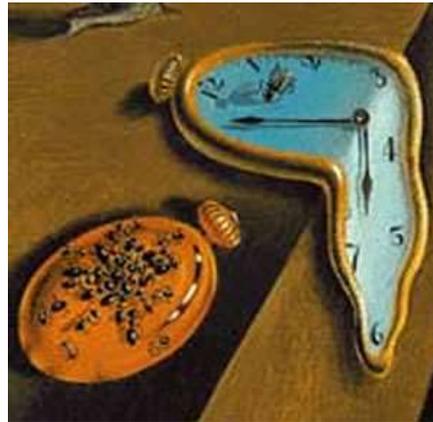
C'est ainsi que Minkowski déclare le 21 septembre 1908 :

« Les vues sur l'espace et le temps que je désire exposer devant vous sont sorties du sol de la physique expérimentale. De là vient leur force. Ces vues sont radicalement nouvelles. Dorénavant l'Espace, considéré séparément, et le Temps, considéré séparément, sont destinés à

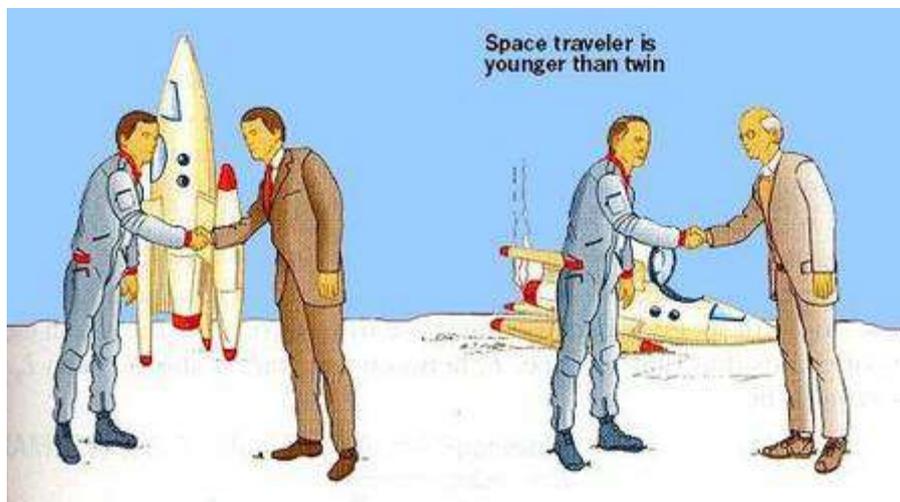
disparaître comme des ombres, et seule une sorte d'union des deux gardera une réalité indépendante »⁵⁶

Il s'en suit la dilatation du temps et de l'espace dans la comparaison des durées et des distances entre deux systèmes en translation rectiligne et uniforme l'un par rapport à l'autre.

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (1)$$



Salvador Dalí, montres molles



Le temps ne s'écoule plus de la même manière dans deux systèmes en mouvement l'un par rapport à l'autre

$$v = (1 - 10^{-32})c$$

$$\Rightarrow \Delta t = 1 \text{ sec} \leftrightarrow \Delta t' = 65\,000\,000 \text{ d'années}$$

⁵⁶ Quatre-vingtième congrès des scientifiques et médecins allemands, 21 septembre 1908, Cologne

La réalité de la prédiction représentée par le voyageur de Langevin a été confirmée par l'observation des muons créés dans la haute atmosphère et projetés à grande vitesse dans toutes les directions de l'espace. Leur détection à la surface de la Terre ne peut se comprendre que grâce à l'interprétation permise par la relativité. On lira à ce propos le **complément 2** de ce document.

$$l' = l \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (2)$$



Les longueurs et distances dépendent de leur état de mouvement par rapport à l'observateur

L'illustration symbolique la plus parlante à cet égard est celle donnée par le paradoxe des jumeaux de Langevin (1911). Pour prendre conscience des interprétations possibles d'une relation comme celle sur le temps (1), comparons les temps qui s'écouleraient dans le référentiel de chacun des jumeaux si l'un d'eux voyageait dans une fusée se déplaçant à une vitesse très légèrement inférieure à celle de la lumière. Par exemple pour une vitesse de la fusée qui serait égale à $c[1 - 10^{-32}]$ (la vitesse de la lumière moins cette même vitesse divisée par un 1 suivi de 32 zéros). Dans ce cas pour un temps de 1 seconde écoulé dans le référentiel de la fusée, 65 millions d'années se seraient écoulées sur Terre. Le jumeau revenant de son voyage aurait vieilli de 1 seconde, alors que sur Terre un temps équivalent à celui qui nous sépare de la disparition des dinosaures se serait écoulé. Il semblerait donc que la notion d'écoulement du temps ne soit pas tant pertinente que celle d'une juxtaposition des instants de tous les temps. A cet égard on peut penser au courant littéraire « *steampunk* »⁵⁷, rétrofuturiste, qui crée des uchronies situant ses récits dans une

⁵⁷ Créé dans les années 1980 et inspiré par l'œuvre de Jules Vernes

diégèse⁵⁸ qui associe l'époque de la révolution industrielle et des futurs lointains. Et le problème de la simultanéité posé par Einstein prend ici une signification dramatique en se substituant à celui de l'écoulement du temps, vidant de sa substance la question de la flèche du temps. Le « contenu » de temps serait ainsi exclusivement dépendant du mode d'observation, d'expérimentation utilisé. Le temps semble soumis au principe de *limitation des concepts* introduit en physique quantique.



Illustration de l'univers « steampunk », diégèse uchronique associant XIXème siècle et temps futurs

La relativité restreinte traite de système en translation rectiligne et vitesse constante les uns par rapport aux autres. Elle ne traite pas des accélérations et donc pas de la gravitation. Or la théorie de Newton sur ce sujet a toujours posé quelques réticences. Avant même qu'elle ne soit formulée par Newton, Descartes exprimait ses doutes à son sujet en critiquant fermement sa première version donnée par Roberval. Ainsi il écrivait :

« M. Roberval, dans Aristarque (1644), soutient que toute la matière de l'univers et chacune de ses parties a une certaine propriété par la vertu de laquelle toute cette matière s'unit et s'assemble en un seul corps continu dont toutes les parties ont inclination et font effort pour se joindre aux autres en s'attirant réciproquement l'une l'autre, pour être le plus étroitement jointes qu'il est possible (...).

⁵⁸ Espace-temps dans lequel se déroule l'histoire proposée par la fiction d'un récit

Pour concevoir cela, il ne faut pas seulement supposer que chaque partie de l'univers est animée et même animée de plusieurs diverses âmes qui ne s'empêchent point l'un l'autre, mais même que les âmes sont intelligentes et toutes divines, pour pouvoir connaître ce qui se passe dans des lieux fort éloignés d'elles sans aucun coursier qui les en avertisse, et pour y exercer leur pouvoir »⁵⁹.

Mais la critique la plus forte de la théorie de l'attraction de Newton a été portée par Leibniz qui commence par un commentaire de Descartes, dont un extrait est reproduit ci-dessous, puis se poursuit longuement par une célèbre controverse dont la défense de Newton était assurée par Samuel Clarke dans le cadre d'une correspondance entre les deux hommes.

« M. Roberval a supposé dans son Aristarque que chaque partie de la matière dont l'univers est composé a une certaine propriété, au moyen de laquelle elles se portent les unes vers les autres et s'attirent réciproquement l'une l'autre.

« M. Descartes censurant cet Aristarque (II 95) trouve cela très absurde et dit que pour concevoir cela il faut supposer que chaque partie de l'univers est animée, et même animée de plusieurs diverses âmes qui ne s'empêchent point l'une l'autre, mais que même ces âmes soient intelligentes et toutes divines pour pouvoir connaître ce qui se passe en des lieux fort éloignés d'elle sans un courrier qui les en avertissent et pour y exercer leur pouvoir.

« Cette supposition de M. Roberval est justement celle de M. Newton (...) »⁶⁰.

La controverse Clarke/Leibniz atteint son paroxysme dans le cinquième écrit commis par Leibniz peu de temps avant sa mort :

« En bonne philosophie et en saine théologie, il faut distinguer entre ce qui est explicable par les natures et ce qui n'est explicable que par les forces de la Substance infinie. Il faut mettre une distance infinie entre l'opération de Dieu qui va au-delà les forces des natures et entre les opérations des choses qui suivent les lois que Dieu leur a données et qu'il les a rendu capables de suivre par leurs natures quoiqu'avec son assistance.

« C'est par là que tombent les attractions proprement dites et autres opérations inexplicables par les natures des créatures qu'il faut faire expliquer par miracle ou

⁵⁹ **DESCARTES**, Lettre à Mersenne 20 IV 1645 (O.C. A et T t. IV p. 529) Trad. Fr. d'André Robinet, dans : Correspondance Leibniz-Clarke P.U.F. 1957 p. 44

⁶⁰ **LEIBNIZ**, 1715 (?) *Handschriften, Philosophie IV 1 4 § 38* (cité par André Robinet, *Corresp. Leibniz/Clarke*, P.U.F. 1957 pp. 43-44)

recourir aux absurdités, c'est-à-dire aux qualités occultes scolastiques qu'on commence à nous débiter sous le spécieux nom de forces mais qui nous reviennent dans le royaume des ténèbres. (...)

« Du temps de M. Boyle (...) on n'aurait pas osé nous débiter des notions si creuses. (...). Le capital de M. Boyle était d'inculquer que tout se faisait mécaniquement dans la physique. Mais c'est un malheur des hommes de se dégoûter enfin de la raison même et de s'ennuyer de la lumière. (...).

« Quant au mouvement des corps célestes, et plus encore quant à la formation des plantes et des animaux, il n'y a rien qui tienne du miracle, excepté le commencement de ces choses. L'organisme des animaux est un mécanisme qui suppose une préordination divine. Ce qui en suit est tout à fait naturel et purement mécanique. (...).

« J'avais objecté qu'une attraction proprement dite, ou à la scolastique, serait une opération en distance, sans moyen.

« On répond ici qu'une attraction sans moyen serait une contradiction...

« Fort bien. Mais comment l'entend-on donc quand on veut que le soleil à travers un espace vide attire le globe de la terre ? Est-ce Dieu qui sert de moyen, mais ce serait un miracle, s'il y en a jamais eu, cela surpasserait les forces des créatures.

« Ou sont-ce peut-être quelques substances immatérielles, ou quelques rayons spirituels, ou quelqu'accident sans substance, quelqu'espèce comme intentionnelle, ou quelqu'autre je ne sais quoi qui doit faire ce moyen prétendu ? Choses dont il semble qu'on a encore bonne provision en tête.

« Ce moyen de communication est, dit-on, invisible, intangible, non mécanique. On pouvait ajouter avec le même droit : inexplicable, non intelligible, précaire, sans fondement, sans exemple.

« Mais il est régulier, dit-on, il est constant, et par conséquent naturel.

« Je réponds qu'il ne saurait être régulier sans être raisonnable, et qu'il ne saurait être naturel sans être explicable par les natures des créatures.

« Si ce moyen qui fait une véritable attraction est constant, et en même temps inexplicable par les forces des créatures, et s'il est véritable avec cela, c'est un miracle perpétuel.

« Et s'il n'est pas miraculeux, il est faux : c'est une chose chimérique, une qualité occulte scolastique.

« Il serait comme le cas d'un corps allant en rond sans s'écarter de la tangente, quoique rien d'explicable n'empêchât de le faire. Exemple que j'ai déjà allégué, auquel on n'a pas trouvé à propos de répondre, parce qu'il montre trop clairement la différence entre le véritable naturel d'un côté, et entre la qualité occulte chimérique des écoles de l'autre côté ».

« (L'oubli du principe de la raison suffisante est) l'origine des chimères, comme par exemple (...) des atomes (...) ou d'une attraction à la scolastique (...) et de mille autres fictions, tant de celles qui sont restées de la persuasion des anciens que de celles qu'on a inventées depuis peu.

« N'est-ce pas à cause de la violation de ce grand principe que les anciens se sont déjà moqués de la déclinaison des atomes d'Epicure ?

« Et j'ose dire que l'attraction à la scolastique que l'on renouvelle aujourd'hui et dont on ne se moquait pas moins il y a trente ans ou environ n'a rien de plus raisonnable. (...).

« Je crois que des personnes raisonnables et impartiales m'accorderont que d'avoir réduit son adversaire à nier ce principe, c'est l'avoir mené ad absurdum »⁶¹.

Ce dernier écrit a été suivi d'une réponse de Clarke que Leibniz n'a probablement pas pu lire, et qui situe bien la portée et la limite du travail de Newton :

« Il est ici très surprenant que, dans une question qui relève de la raison, et non de l'autorité, nous soyons encore renvoyé à l'opinion de certains philosophes et théologiens. Mais négligeons cela. Qu'est-ce que l'auteur veut dire par une différence interne, réelle, entre ce qui est miraculeux et ce qui ne l'est pas, ou entre des opérations naturelles et des opérations qui ne le sont pas, absolument, et à l'égard de Dieu ? Pense-t-il qu'il y ait en Dieu deux principes d'actions, deux puissances différentes et réellement distinctes et qu'une chose est plus difficile à Dieu qu'une autre ? Sinon, aussi bien l'action naturelle que l'action surnaturelle de Dieu sont des termes qui n'ont de sens que pour nous : nous appelons naturelle une puissance habituelle de Dieu et surnaturelle une puissance inhabituelle, la force de la nature n'étant en réalité qu'un mot vide. Ou encore par l'une doit être entendue ce que Dieu fait immédiatement lui-même et par l'autre ce qu'il fait par le moyen de causes secondes (...).

« Il est vraiment déraisonnable d'appeler l'attraction un miracle, et c'est un terme qui n'est pas philosophique. Ensuite il a été si souvent déclaré distinctement que par ce terme nous ne voulons pas la cause de la tendance des corps les uns vers les autres, mais seulement l'effet, le phénomène lui-même, ou les lois et les proportions de cette tendance découvertes par expérience, quelle qu'en soit la cause.

« Et il semble encore plus déraisonnable de ne pas admettre l'attraction ou la gravitation dans ce sens, à savoir manifestement, un phénomène naturel actuel, et cependant, d'admettre en même temps une hypothèse aussi étrange que l'harmonie préétablie, d'après laquelle l'âme et le corps de l'homme n'ont pas plus d'influence sur

⁶¹ LEIBNIZ, Cinquième Ecrit, VIII 1716 §§ 112-123 (Corresp. Leibniz Clarke, pp.175-179)

les mouvements de l'un et les affections de l'autre que deux horloges qui, à une grande distance l'une de l'autre, fonctionnent en même temps sans qu'elles s'affectent l'une l'autre (...).

« Que le soleil attire la terre, à travers l'espace vide intermédiaire, c'est-à-dire, que la terre et le soleil gravitent l'un vers l'autre avec une force qui est en proportion de leurs masses, (...) et dans une proportion inverse de leur distance, et que l'espace entre eux est vide, c'est-à-dire n'a rien en lui qui sensiblement résiste au mouvement des corps qui le traversent, tout cela est un phénomène, un fait actuel, découvert par l'expérience.

« Que le phénomène n'est pas produit « sans moyen », c'est-à-dire sans quelque cause capable de le produire, est indubitable. Les philosophes peuvent donc chercher et découvrir cette cause, s'ils en sont capables, qu'elle soit mécanique ou non. Mais s'ils ne peuvent découvrir cette cause, est-ce que l'effet lui-même, le phénomène, le fait découvert par l'expérience (et c'est tout ce que signifient les termes d'attraction et de gravitation) en devient moins vrai ? Ou est-ce qu'une qualité manifeste doit être appelée occulte parce que sa cause immédiate est peut-être occulte ou pas encore découverte ? Quand un corps se meut circulairement sans prendre la tangente, il est certain qu'il y a quelque chose qui l'en empêche. Mais si ce n'est pas mécaniquement explicable ou si on n'a pas encore découvert ce que c'est, s'ensuit-il que le phénomène est faux ? Ce serait là un raisonnement vraiment singulier.

« Le phénomène lui-même : l'attraction, la gravitation, la tendance des corps les uns vers les autres, ou comme on voudra dire, sont maintenant suffisamment connus par les observations et des expériences.

« Si cet auteur ou un autre peuvent expliquer ces phénomènes par les lois de la mécanique, ils ne seront pas contredits, mais recevront les remerciements du monde cultivé.

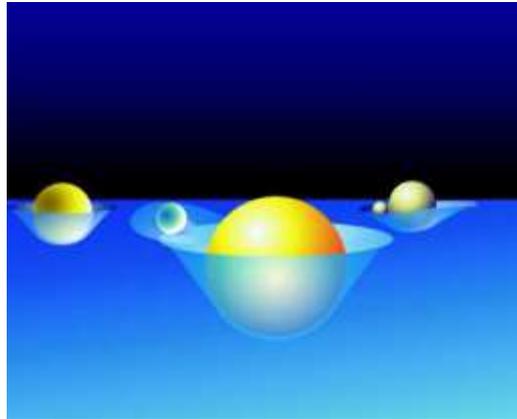
« Mais comparer la gravitation, qui est un phénomène ou un fait actuel, avec la déclinaison épicurienne des atomes (...) qui n'était qu'une hypothèse, une fiction (...) c'est une très extraordinaire méthode de raisonnement (...) »⁶².

Au terme de dix années de labeur harassant intégrant la difficile géométrie à quatre dimension à la physique, dans un atmosphère de concurrence avec Hilbert⁶³, le patron à Göttingen, de la plus grande école de géométrie de l'époque, Einstein crée la relativité générale où il décrit un univers qui prend place dans un espace-temps courbé

⁶² CLARKE, Cinquième Réponse § 110-116 118-123 124-130 X 1716 (Corresp. Leibniz-Clarke pp 206-210.

⁶³ Hilbert écrit alors : « N'importe quel gars, dans les rues de Göttingen, comprend mieux qu'Einstein la géométrie à quatre dimensions. Malgré cela, c'est Einstein qui a fait le travail, pas les mathématiciens »

par les champs gravitationnels et dans lequel les phénomènes émettent des ondes dites elles aussi gravitationnelles. Ces ondes, dont l'existence a été prédite par Einstein en 1915 n'auront été observées qu'un siècle plus tard lors de la coalescence de deux trous noirs de quelques 30 masses solaire chacun⁶⁴.

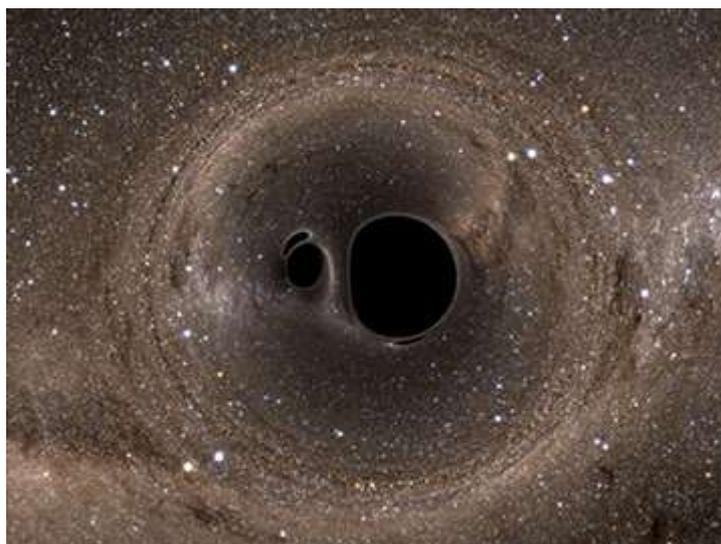
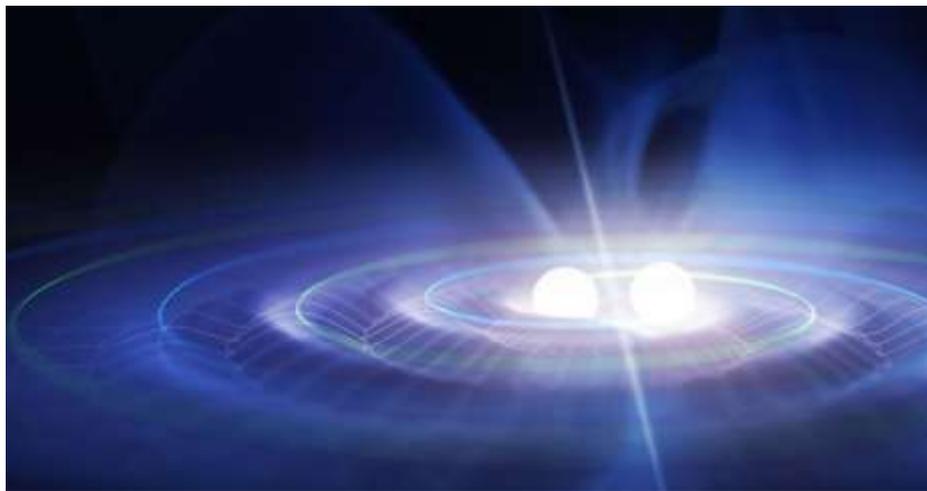


Les champs gravitationnels courbent l'espace et ralentissent le rythme du temps



*Les trous noirs tordent-ils le temps ?
Distorsion de l'espace-temps.
F. DUENZL/DPA/CORBIS*

⁶⁴ La coalescence de deux trous noirs observée le 14 septembre 2015 à 11 h 51, il y a 1,3 milliards d'années (évaluation dont la précision est à 0,6 milliards d'années près), dans une galaxie très lointaine, deux trous noirs qui tournaient l'un autour de l'autre et pesaient chacun environ 30 soleils ont fini par se rencontrer à 200 000 kilomètres/seconde (les deux tiers de la vitesse de la lumière !) et fusionner. Cet événement cataclysmique, baptisé GW150914, a, en une fraction de seconde, converti en ondes gravitationnelles une énergie équivalant à trois fois la masse du Soleil. Cette découverte a donné lieu à l'attribution du Prix Nobel de Physique 2017.



La fusion de deux trous noirs permet pour la première fois de détecter les ondes gravitationnelles prédites par Albert Einstein. La gravitation vers la dualité onde-corpuscule ?⁶⁵

Depuis 1905 et la découverte de la relativité, on sait que le temps est une 4^{ème} dimension de l'espace, indissociable de celui-ci. Il n'est plus le cadre des phénomènes mais au contraire c'est la matière qui influe sur lui.

On peut représenter concrètement ces notions : si l'espace est représenté en 2 dimensions (un drap bleu), la matière (sous forme de boules jaunes) le courbe en une 3^{ème} dimension, le temps. Plus la matière est dense, plus le creux formé dans l'espace est grand, plus le temps se « dilate ». Ainsi, si l'on synchronise deux horloges au même niveau (la même altitude) dans une même pièce, qu'on en pose une au sol et monte l'autre au plafond, puis qu'on les rassemble, on constate alors qu'elles sont

⁶⁵ Op. cit. « La coalescence de deux trous noirs observée le 14 septembre 2015 à 11 h 51 »

désynchronisées. Elles indiquent des heures différentes, l'horloge ayant passé quelques instants au sol se trouve en retard par rapport à celle qui a été placée au plafond. La précision des mesures atteignables aujourd'hui permet de mesurer la différence de temps marquée par les deux horloges. C'est sur le principe théorique de cette expérience que repose le fonctionnement du système de géolocalisation, notamment baptisé « Global Positioning System ».

Parmi les contemporains d'Einstein, Marcel Proust fut l'un de ceux, rares, à avoir compris ou senti la portée immense de la relativité sur notre compréhension de ce qu'est le temps. Ainsi il écrit : « *Si du moins il m'était laissé assez de temps pour accomplir mon œuvre, je ne manquerais pas de la marquer du sceau de ce Temps dont l'idée s'imposait à moi avec tant de force aujourd'hui, et j'y décrirais les hommes comme occupant une place autrement considérable que celle si restreinte qui leur est réservée dans l'espace, une place au contraire prolongée sans mesure – puisqu'ils touchent simultanément, comme des géants plongés dans les années, à des époques si distantes, entre lesquelles tant de jours sont venus se placer – dans le Temps.* »⁶⁶

Marcel Proust (1871-1922)
A la recherche du temps perdu



31 mars 1922 : M. Painlevé fait lui-même la police afin d'empêcher l'entrée d'un public trop nombreux venu pour écouter M. Einstein⁶⁷/Agence Meurisse, 1922, BnF

⁶⁶ Dernière phrase du *Temps retrouvé*, probablement réécrite au printemps 1922, évocatrice de l'Espace – Temps einsteinien

⁶⁷ Pour un compte rendu voir l'article de Michel Paty « Einstein et la philosophie en France : à propos du séjour de 1922 », paru dans la revue « La Pensée » n°210 pp 3-29, ainsi que le colloque « Einstein au Collège de France – 11-12 juin 2018, dont on trouvera les vidéo des conférences sur le site web du Collège de France <https://www.college-de-france.fr/site/college/index.htm>

La conséquence des relativités restreinte et générale est que le temps n'est pas utile pour décrire le monde. Il est remplacé dans une vision « *univers bloc* » de l'espace-temps. Cette idée d'un univers sans temps représentait cependant pour Einstein une résignation douloureuse, et le philosophe viennois Rudolf Carnap rapportant une de ses conversations avec le physicien écrit : « Mais Einstein pensait que ces descriptions scientifiques ne peuvent prétendre satisfaire nos besoins humains ; qu'il y a quelque chose d'essentiel à propos du Maintenant qui reste simplement hors de portée de la science »⁶⁸.

« *En dehors de moi, dans l'espace, il n'y a jamais qu'une position unique de l'aiguille et du pendule, car des positions passées il ne reste rien. Au dedans de moi, un processus d'organisation ou de pénétration mutuelle des faits de conscience se poursuit, qui constitue la durée vraie.* »⁶⁹ Ce concept de durée est fondamental dans sa philosophie : il permet à Bergson de penser l'expérience intime du temps, et de lier cette expérience avec la matière même de notre conscience. Il définit ainsi la durée comme « *la forme que prend la succession de nos états de conscience quand notre moi se laisse vivre* ».

⁶⁸ *The Philosophy of Rudolf Carnap : Intellectual Autobiography*, ed. Paul Arthur Schillp, La Salle, IL: Open court, 1963, pp.37-8.

⁶⁹ *Essai sur les données immédiates de la conscience* (1889) Henri Bergson

ii. La physique quantique

A la fin du XIX^{ème} siècle apparait la nécessité d'un changement de paradigme pour comprendre des phénomènes que la physique classique, de Newton à Maxwell, ne permet pas d'interpréter.

- L'effet photoélectrique
- Comment relier la valeur de la température aux couleurs d'un tisonnier brûlant et à l'intensité de cette lumière émise ? Ce problème deviendra celui dit du rayonnement du corps noir.

Wien propose une loi qui exprime l'intensité de la lumière émise par un corps noir en fonction de sa température. Cette loi correspond à une courbe en cloche dissymétrique qui rend très bien compte d'une part des variations de l'intensité aux courtes longueurs d'onde et d'autre part du fait que le maximum de la courbe se déplace vers les courtes longueurs d'onde lorsque la température augmente. Par contre elle échoue totalement à rendre compte des données expérimentales au grandes longueurs d'onde. Prenant en compte exclusivement ces trois éléments Max Planck se met à la recherche sans autre *a priori* d'une nouvelle loi. En 1900 à son grand désespoir⁷⁰ il aboutit à une loi qui, si elle rend parfaitement compte de toutes les données expérimentales qui se sont multipliées au fur et à mesure que s'améliorait l'aptitude des physiciens à élaborer des corps noirs de qualité et la précision de leurs mesures, imposait le quantum.

La mécanique quantique fait apparaître la « *limitation des concepts* », qu'elle exprime par le principe d'indétermination de Heisenberg :

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

Auquel on peut faire correspondre un analogue avec les grandeurs complémentaires temps et énergie :

$$\Delta t \Delta E \geq \frac{\hbar}{2}$$

La constante de Planck traduit le fait que l'énergie existe par quantités minimum, des grains d'énergie, appelés quanta qui dans le cas de la lumière valent :

⁷⁰ En 1882 Planck écrit : « *en dépit du grand succès dont jouit jusqu'ici la théorie atomique, elle finira par être abandonnée en faveur de l'hypothèse de la matière continue* » (in *The Dilemmas of an Upright Man : Max Planck and Fortune of German Science*, Cambridge, MA : Havard University Press – 2000). Dix huit ans après, les preuves expérimentales de l'existence de l'atome n'ayant toujours pas été apportées de façon irréfutable, Planck ne croyait toujours pas à leur existence.

$$E = h\nu$$

Cette description reste cependant cohérente avec la description de la mécanique classique par l'utilisation de la longueur d'onde λ qui permet de calculer la quantité de mouvement $\mathbf{p} = \frac{h}{\lambda}$

A la coexistence de cette de cette double description quantique et classique correspond dès lors la dualité onde-corpuscule et de quantification de l'énergie, qui rend indispensable le dépassement du concept de trajectoire. Celui-ci est remplacé par la notion de probabilité de présence. Il s'agit donc d'une vision indéterministe du monde.

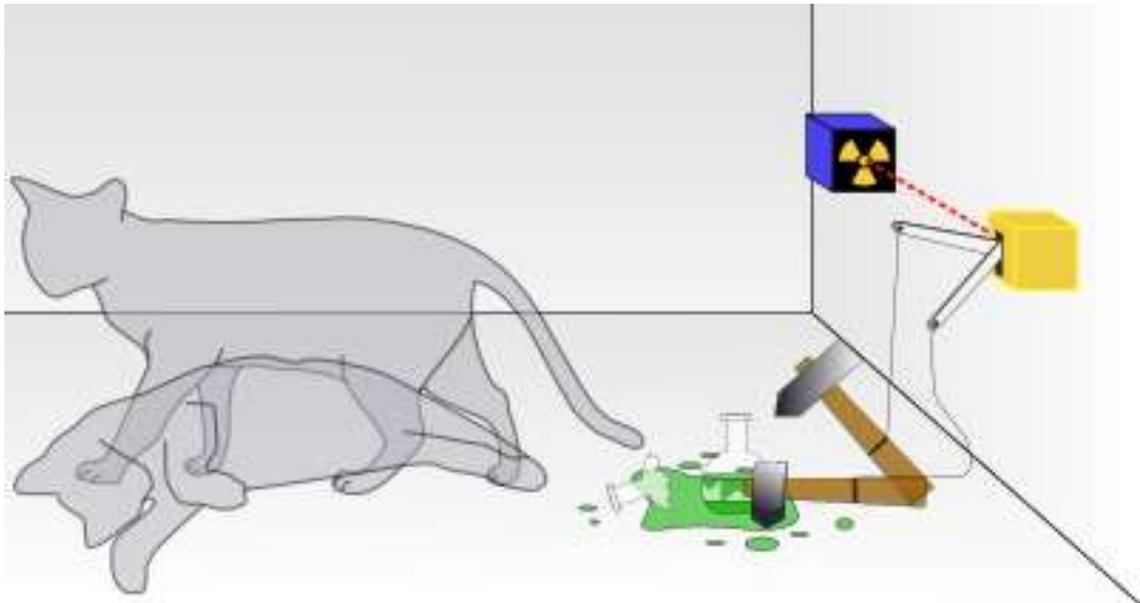
La mécanique quantique à toute grandeur mesurable appelée observable attribut un opérateur \mathcal{O} .

Les états de la matière sont décrits par les solutions de l'équation de Schrödinger :

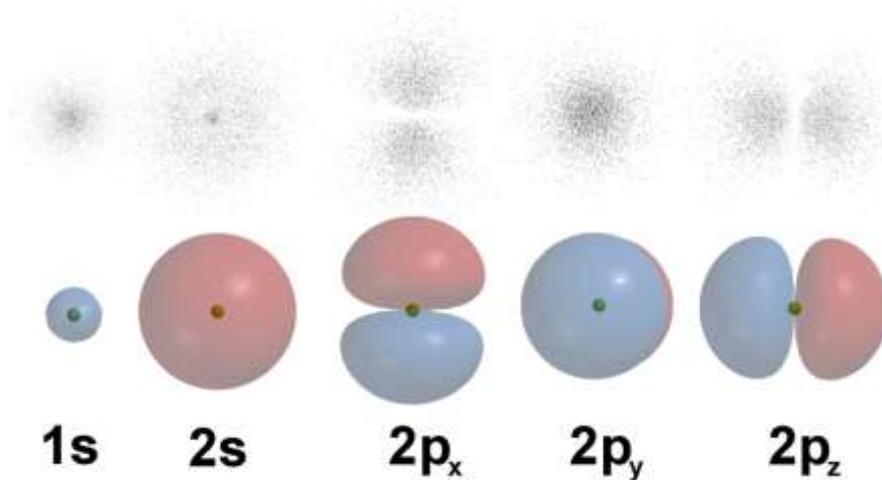
$$\hat{H}|\Psi(t)\rangle = \left[\frac{\hat{p}^2}{2m} + V(\vec{r}, t) \right] |\Psi(t)\rangle = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\Psi(t)\rangle$$

- Les valeurs que peut prendre cet observable sont les valeurs propres de l'opérateur
- Ces valeurs propres sont « prises » avec une certaine probabilité, définie par les fonctions propres $\Psi(t)$ de l'opérateur \mathcal{O}

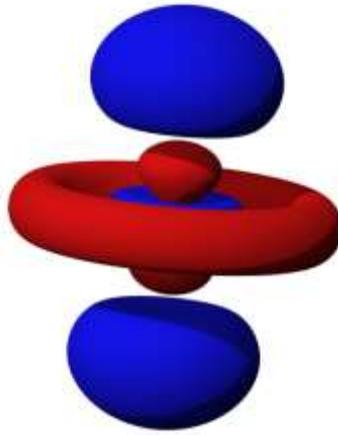
Grace à Paul Dirac, la mécanique quantique nous dit qu'un système se trouve toujours dans une combinaison linéaire de l'ensemble des états qui lui sont accessibles (ses « états propres »). Les coefficients de cette combinaison définissent la probabilité de chacun de ces états propres. En l'absence d'observation, c'est-à-dire d'interaction, le système se trouve dans un état de superposition de tous ses états propres. Une illustration imagée de ce principe, le principe de superposition, est donnée par l'expérience du chat de Schrödinger. Par cette description probabiliste du monde fait de la physique quantique une théorie indéterministe. Les états attracteurs des objets quantiques ne sont plus des trajectoires. Ces objets ne manifestent une existence que lors des interactions qu'ils subissent, entre deux interactions ils « n'existent pas ».



Un chat est enfermé dans une boîte avec un flacon de gaz mortel et une source radioactive. Si un compteur Geiger détecte un certain seuil de radiations, le flacon est brisé et le chat meurt. Selon l'interprétation de Copenhague, le chat est à la fois vivant et mort. Pourtant, si nous ouvrons la boîte, nous pourrions observer que le chat est soit mort, soit vivant.



Représentation des nuages de probabilité de présence de l'électron (en haut) et des isosurfaces à 90 % (en bas) pour les orbitales 1s, 2s et 2p. Dans le cas des orbitales 2p, les trois isosurfaces 2p_x, 2p_y et 2p_z représentées correspondent à $\ell = -1$, $\ell = 0$ et $\ell = +1$. Les couleurs indiquent la phase de la fonction d'onde : positive en bleu, négative en rouge.



*Isosurface d'une orbitale 4d
d'un atome hydrogénoïde correspondant au triplet de nombres
quantiques $(n, \ell, m_\ell) = (4, 2, 0)$. La fonction d'onde est positive
en bleu et négative en rouge.*

Lors de l'observation (la mesure faite par l'expérience) on trouvera le système dans un de ses « états propres ». On dit que la mesure « réduit le paquet d'ondes », en d'autres termes c'est la mesure qui fait basculer le système dans un état « réel » (travaux de Werner Heisenberg), et tel ou tel état se trouve atteint avec une probabilité qui est définie par les coefficients affectés à chaque état propre dans le développement de sa « fonction d'ondes ». Ainsi, d'après la mécanique quantique c'est l'être humain qui crée l'évènement et, par suite, c'est lui qui crée, et crée l'irréversibilité du temps. La mécanique quantique dans l'opposition eschatologique⁷¹ entre la loi et l'évènement se range ainsi du côté de la loi.

Temps et mécanique quantique :

Le temps intervient en mécanique quantique par l'intermédiaire de l'équation de Schrödinger :

$$H\Psi = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi$$

H représente le Hamiltonien. Il est fonction de deux variables : \mathbf{p} , la quantité de mouvement et \mathbf{q} , la (les) coordonnée de position, liées entre elles par la relation d'indétermination de Heisenberg ($\Delta p \cdot \Delta x > \hbar$), qui traduit la limitation des concepts⁷².

Ψ , la fonction d'onde ne dépend que d'une des deux variables ci-dessus.

⁷¹ L'adjectif « eschatologique » est ici employé dans le sens donné à l'eschatologie par Roger Garaudy dans *Parole d'homme* : « l'eschatologie ne consiste pas à dire : voilà où l'on va aboutir, mais à dire : demain peut être différent, c'est-à-dire : tout ne peut pas être réduit à ce qui existe aujourd'hui ».

⁷² La limitation des concepts fait référence au fait que les concepts mêmes de distance et d'impulsion (ou de vitesse) perdent leur sens en-deçà des limites numériques exprimées par la relation d'indétermination (d'incertitude) de Heisenberg.

La mécanique quantique est **indéterministe** car l'état d'un système est une combinaison linéaire d'états propres :

$$\Psi = \sum_i c_i \varphi_i$$

Il y a un seul cas où la mécanique quantique est déterministe : lorsque par exemple

$$\Psi = \varphi$$

dans ce cas le résultat d'une expérience peut être prévu avec certitude. Dans les autres cas la mécanique quantique donne une information statistique.

Concernant la dépendance temporelle de l'état d'un système, l'équation de Schrödinger décrit une **évolution déterministe** de Ψ . Ainsi au mouvement réversible sur la trajectoire décrite en mécanique classique correspond l'évolution réversible de la fonction d'état Ψ . Lorsque Ψ est connue le passé et l'avenir du système sont connus. Ceci correspond au fait que le temps t n'est pas un opérateur en mécanique quantique. Le temps t est un nombre et les relations d'indétermination de Heisenberg ne s'appliquant pas stricto sensu au temps.

...

La mécanique quantique a découvert trois aspects du monde⁷³ :

- *La granularité.* L'information qui est dans l'état d'un système est finie et limitée par la constante de Planck
- *L'indéterminisme.* Le futur n'est pas déterminé de manière univoque par le passé.
- *Le relationnisme.* Les événements de la nature sont toujours les interactions.

L'indéterminisme, la disparition de la notion de trajectoire et de position au sens classique font de la mécanique quantique une théorie non locale. Einstein estimait que cela était dû à l'inaccessibilité de certaines grandeurs réelles, qualifiées par lui de « variables cachées ». Ainsi⁷⁴, dans un article de 1935, cosigné avec Boris Podolsky et Nathan Rosen, Einstein pose la question suivante concernant les particules intriquées : « *la description quantique de la réalité physique peut-elle être considérée comme complète ?* »

Non disent les trois auteurs en se basant sur les trois hypothèses suivantes :

1. Les prédictions de la physique quantique sont justes
2. Aucune influence ne peut se propager plus vite que la vitesse de la lumière (critère de localité qui implique que si deux événements sont si éloignés dans

⁷³ D'après Carlo Rovelli, *Par-delà le visible, La réalité du monde physique et la gravité quantique* Ed. Odile Jacob, coll. Sciences, 2014

⁷⁴ D'après l'article de C. Rovelli et E. Klein, « *Les nouveaux défis de la physique quantique* », pour la Science n° 500, juin 2019, pp 26-37

l'espace et si rapprochés dans le temps que la lumière ne peut pas les relier, alors aucun de ces deux évènements ne peut agir sur l'autre). Si on applique ce critère de localité aux particules cela implique que chaque particule transporte avec elle c'est-à-dire localement, les propriétés qui déterminent les résultats des mesures.

3. L'hypothèse de réalité : elle indique que si l'on peut prédire avec certitude la valeur d'une grandeur physique, alors il existe un élément de la réalité correspondant à cette grandeur. Le formalisme doit intégrer cet élément de réalité sans quoi il ne serait pas complet. D'où il découle d'après le célèbre article publié en 1935 par Einstein, Podolsky et Rosen ⁷⁵, qu'il existe une ou des variables cachées.

Ce questionnement, baptisé « paradoxe EPR » (pour Einstein-Podolsky-Rosen) sur la non-localité de la physique quantique a été formulé par John Bell en 1964 sous la forme d'inégalités qui portent son nom, et tranché expérimentalement par les expériences d'Alain Aspect en 1980, qui ont montré que ces inégalités sont violées impliquant que la théorie quantique est non locale. Ainsi deux particules (photons, électrons,...) ayant constitué un système unique à un moment de leur existence, continuent à n'en former qu'une par la suite, quelle que soit la distance qui les sépare. Une action effectuée sur l'une aura donc instantanément un effet aussi sur l'autre. Ceci n'est pas sans conséquence sur la signification de ce que nous nommons « espace ».

⁷⁵ [Albert Einstein](#), [Boris Podolsky](#) et [Nathan Rosen](#), « Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? », *Phys. Rev.*, vol. 47, 1935, p. 777-780

Le renversement du temps et la violation de la symétrie CP :

L'irréversibilité du sens de l'écoulement du temps ayant été prouvée pour des systèmes contenant un grand nombre d'éléments, on peut se demander si cette irréversibilité n'est qu'une propriété qui émerge avec le nombre des constituants ou s'il est possible de l'observer au niveau d'une particule unique. Ou, autrement dit : a-t-on déjà observé, conformément au caractère réversible du temps affirmé par la mécanique quantique, un renversement du temps au niveau d'une particule quantique ?

Il semble bien que oui dans le cas du méson K^0 . Pour cela il faut considérer certaines des propriétés de cette particule élémentaire, caractérisées par les trois opérateurs mathématiques C, P et T.

C : opérateur mathématique de **Conjugaison** de la charge (correspond à la transformation d'une particule en son antiparticule)

P : **Parité** = inversion des axes du système de coordonnées

x	\rightarrow	$-x$
y	\rightarrow	$-y$
z	\rightarrow	$-z$

T : renversement du temps

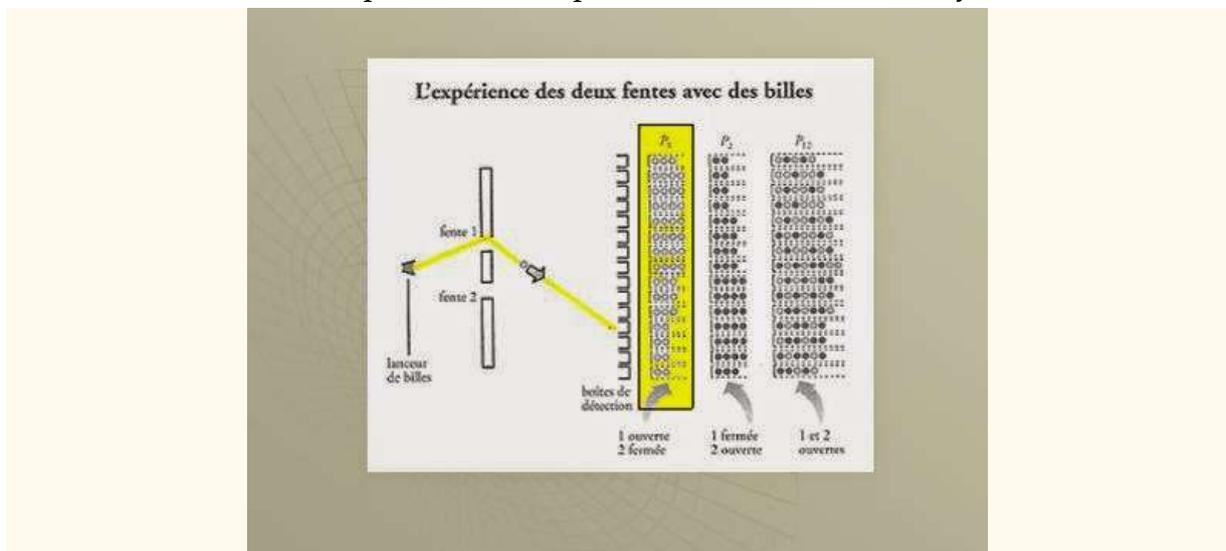
Jusqu'en 1964 on pensait que la combinaison CP de ces deux opérateurs C et P constituait une symétrie de la nature. Ainsi si une réaction donnée a lieu, alors la réaction symétrique, c'est-à-dire la même mais vue dans un miroir et avec des antiparticules, est également possible, cette dernière a les mêmes caractéristiques. Or cette symétrie s'avère partiellement violée par le méson K^0 (le Kaon neutre).

En 1950 théorème CTP : le produit CTP des trois opérateurs C, T et P est une symétrie exacte de la nature. Donc la violation partielle de CP est permise à condition que T soit lui aussi violé, c'est-à-dire de renverser le temps.

Conséquences sur le temps de la dualité onde-corpuscule et du principe de complémentarité

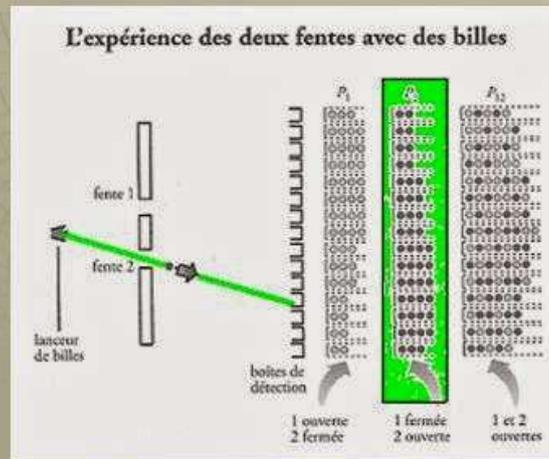
D'autres caractéristiques tout à fait étonnantes du temps peuvent être mises en évidence grâce à la physique quantique. Pour cela il faut se reporter à l'interprétation que Richard Feynman donne des expériences d'interférences prenant en compte deux aspects essentiels de la physique quantique : la dualité onde-corpuscule et le principe de complémentarité⁷⁶. Ces expériences montrent que des particules, chacune envoyées après que la précédente soit arrivée sur le détecteur, donnent lieu, dès lors qu'on ne cherche pas à les observer avant le détecteur, à un phénomène d'interférence. Ceci ne peut s'interpréter qu'en considérant que la particule est passée par les deux chemins possibles, et a donc interféré avec elle-même. Par contre, si on tente de savoir par quel chemin (quelle fente) passe la particule, en interagissant avec elle, même très faiblement, au niveau où elle fait son choix (soit passer par les deux fentes à la fois et interférer, soit passer par l'une des fentes), alors on observe une réduction du paquet d'onde et la particule passe par l'une des fentes, comme une particule classique, et dans ce cas ne donne pas lieu à interférences mais seulement à deux « paquets » d'impacts en face des fentes.

Fentes d'Young et lancement de billes, d'ondes, de particules : Les expériences et le point de vue de Richard Feynman

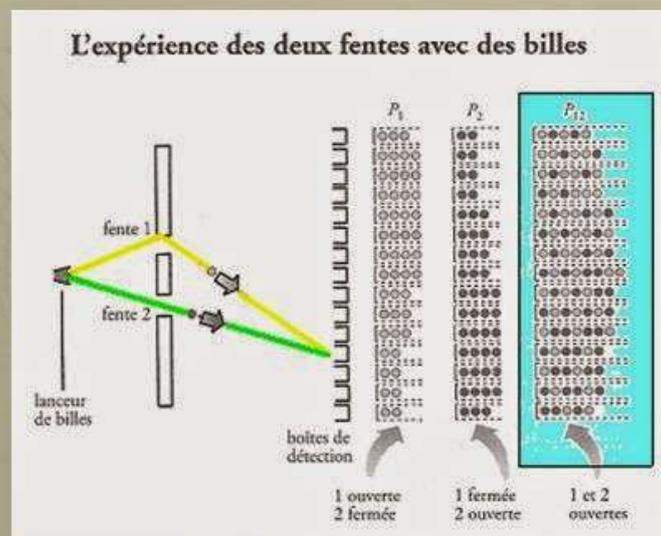


On ferme la fente 2 et on lance des billes blanches les impacts des billes présentent une répartition gaussienne (encadré jaune) avec un maximum placé en face de la fente 1, par laquelle sont passées toutes les billes

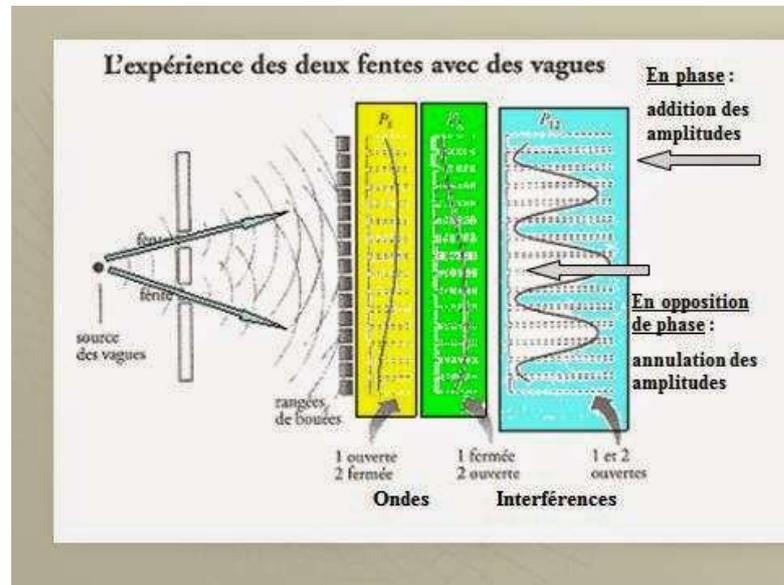
⁷⁶ M. O. Scully, B.-G. Englert et H. Walther, *Quantum optical tests of complementarity*, Nature, Vol 351, 1991, pp 111-116



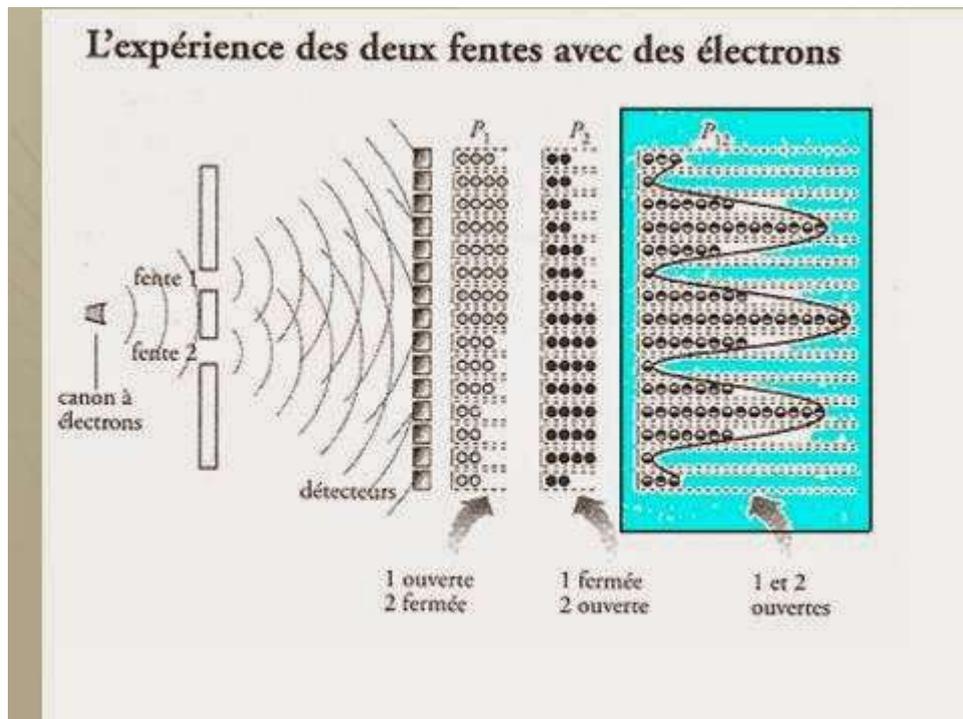
On ferme la fente 1 et on lance des billes noires les impacts des billes présentent une répartition gaussienne (encadré vert) avec un maximum placé en face de la fente 2, par laquelle sont passées toutes les billes



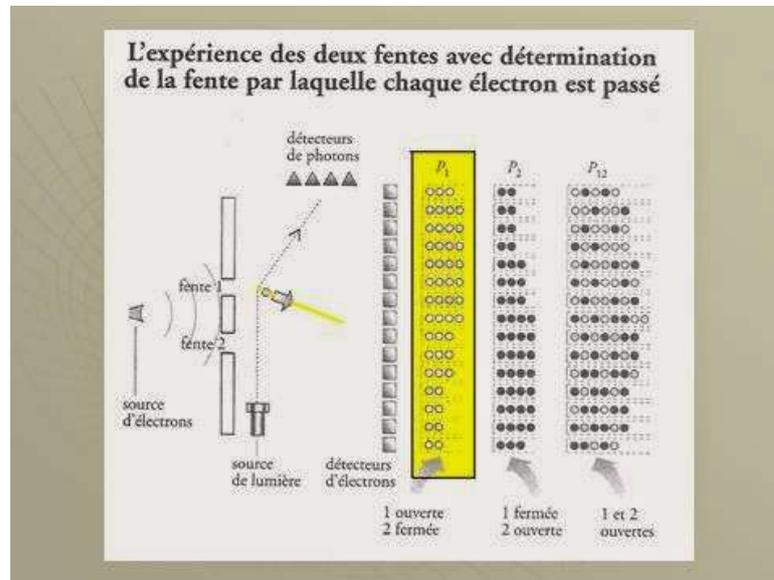
On ouvre les deux fentes et on lance des billes blanches à travers la fente 1 et des billes noires à travers la fente 2. Les impacts des billes se répartissent selon deux gaussiennes identiques aux deux expériences précédentes, au total les impacts dus à cette expérience sont simplement la somme des deux précédents (encadré bleu)



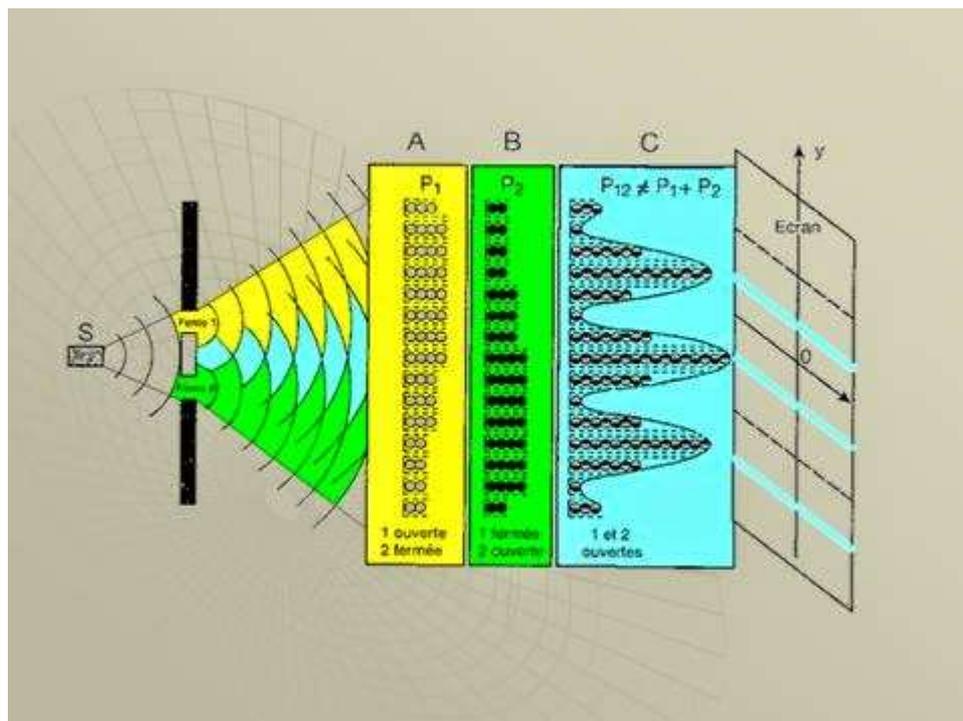
Si on refait ces expériences avec des ondes lumineuses, alors lorsqu'une seule fente est ouverte le résultat est comparable à celui obtenu pour les billes (en fait pas tout à fait car si les fentes sont assez fines en comparaison de la longueur d'onde on observe un phénomène de diffraction). Lorsque les deux fentes sont ouvertes, on observe un phénomène nouveau qui n'est plus du tout la somme des deux précédents : des zones alternativement sombres et brillantes apparaissent sur l'écran. C'est le phénomène d'interférence, dû au fait que se superposent des rayons lumineux qui ont parcouru des distances différentes et se trouvent déphasés à l'arrivée alors qu'ils étaient en phase lorsqu'ils ont été émis

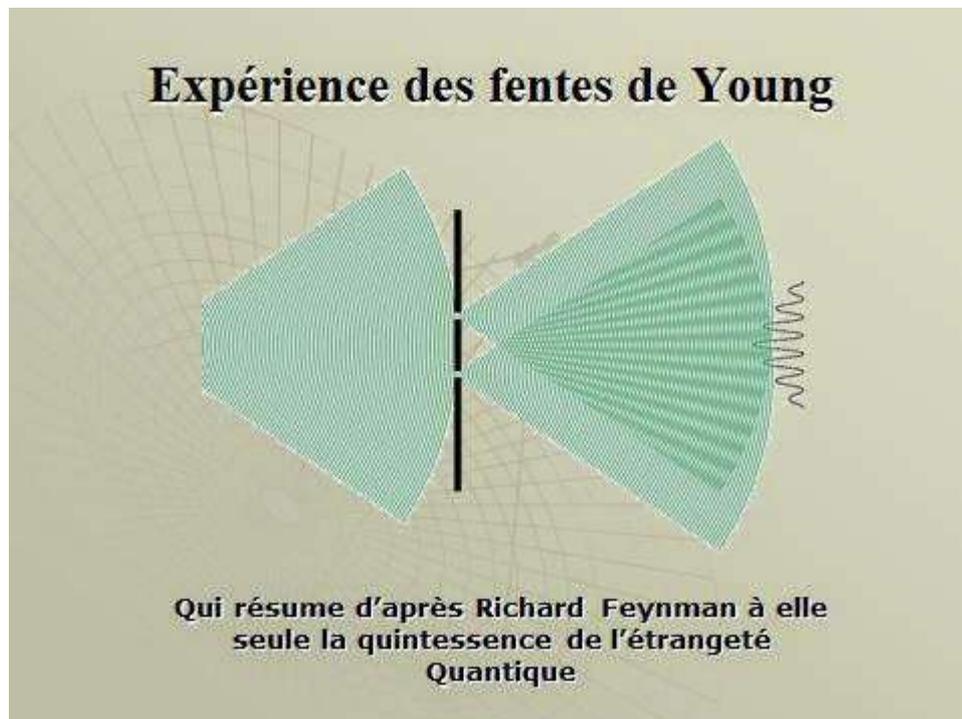


Si on fait l'expérience ci-dessus en utilisant des électrons, envoyés un par un, on obtient exactement le même résultat qu'avec des ondes lumineuses. Il semble que chaque électron soit passé par les deux fentes simultanément. C'est le résultat de la dualité onde-corpuscule. Feynman nous dit que l'électron a en fait suivi simultanément tous les chemins qui lui sont possibles



Lorsqu'on essaie de savoir quel a été le parcours exact de chaque électron, en observant juste derrière chaque fente grâce à une source lumineuse associée à un détecteur, alors contraint « a posteriori » l'électron à suivre un chemin unique, la particule se comportant ainsi comme une bille. En mécanique quantique on dit qu'il y a eu réduction du paquet d'onde.





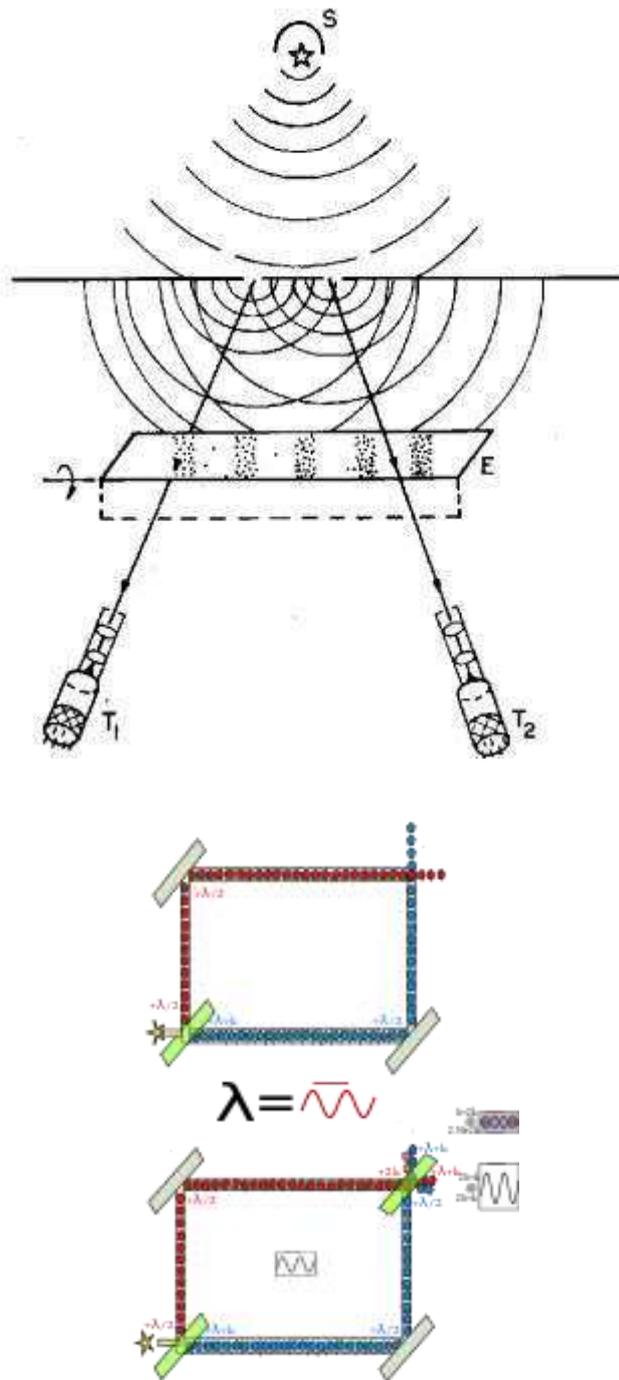
Des expériences d'interférences avec particule unique (électrons, photons, atomes d'hélium,...) ont été menées avec succès. Montrant la pertinence l'interprétation de Feynman. Les physiciens n'en sont pas restés là, et avec John Archibald Wheeler, ont osé imaginer la possibilité offerte par la mécanique quantique d'agir sur le passé. J. A. Wheeler⁷⁷ a conçu le principe d'une expérience dite à choix retardé, dans laquelle il imagine une intervention pour détecter le chemin suivi par la particule après que celle-ci ait fait son choix (se comporter comme une onde ou se comporter comme une particule). Il prévoit que la façon de détecter impose *a posteriori* le comportement qu'a eu la particule, et donc que l'on peut agir sur le passé, en le modifiant. Les systèmes quantiques se comportent comme si on pouvait gommer le passé pour le remplacer par un autre. Pour cette raison, les expériences qui illustrent ce phénomène sont appelés « expériences de la gomme quantique »⁷⁸

⁷⁷ John Archibald Wheeler, "The 'Past' and the 'Delayed-Choice Double-Slit Experiment'," pp 9–48, in A.R. Marlow, editor, *Mathematical Foundations of Quantum Theory*, Academic Press (1978) ;

John Archibald Wheeler & Wojciech Hubert Zurek, *Quantum theory and measurement*, Princeton Series in Physics ;

W.K. Wootters & W. H. Zurek, *Complementarity in the double-slit experiment : Quantum nonseparability and quantitative statement of Bohr's principle*, Physical Review D, Vol. 19, n° 2, pp 473-484, 1979

⁷⁸ Y.-H. Ki, R. Yu, S.P. Kulik, Y. Shih & M.O. Scully, Phys. Rev. Lett. 84, pp 1-5, 2000



Schémas de l'expérience de Wheeler. Illustration de l'impact du mode de détection a posteriori sur le comportement de la particule, permettant d'imposer a posteriori (de façon retardée) le choix fait par la particule

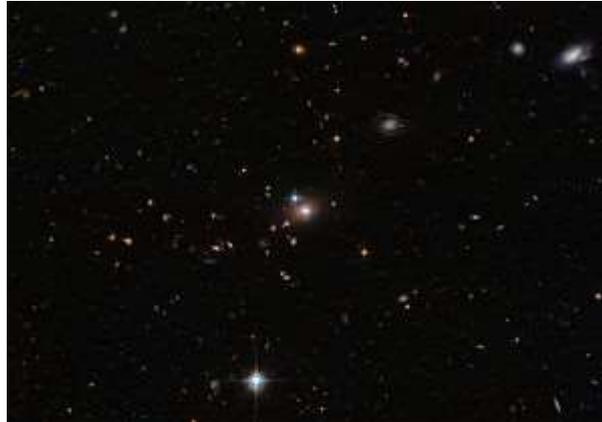
Crédits : <http://www.npl.washington.edu>

Alain Aspect et Philippe Grangier⁷⁹ ont réalisé une expérience magistrale démontrant les prévisions de Wheeler en faisant interférer un photon avec lui-même

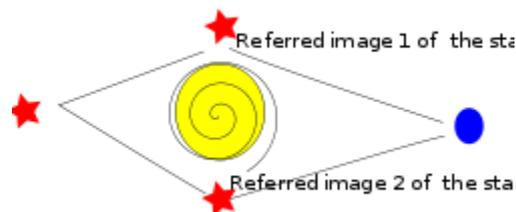
⁷⁹ *Experimental evidence for a photon anticorrelation effect on a beam splitter : a new light on single-photon interferences*, P. Grangier, G. Roger and A. Aspect, *Europhysics Letters*, 1(4), 1986, pp 173-179

dans un interféromètre de Mach-Zehnder. L'expérience a été refaite par Vincent Jacques⁸⁰ avec un biprisme de Fresnel.

L'expérience de Wheeler appelle une interrogation sur la possibilité de l'appliquer à des objets macroscopiques.



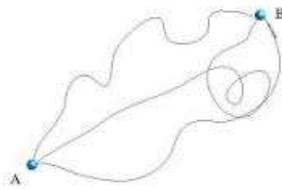
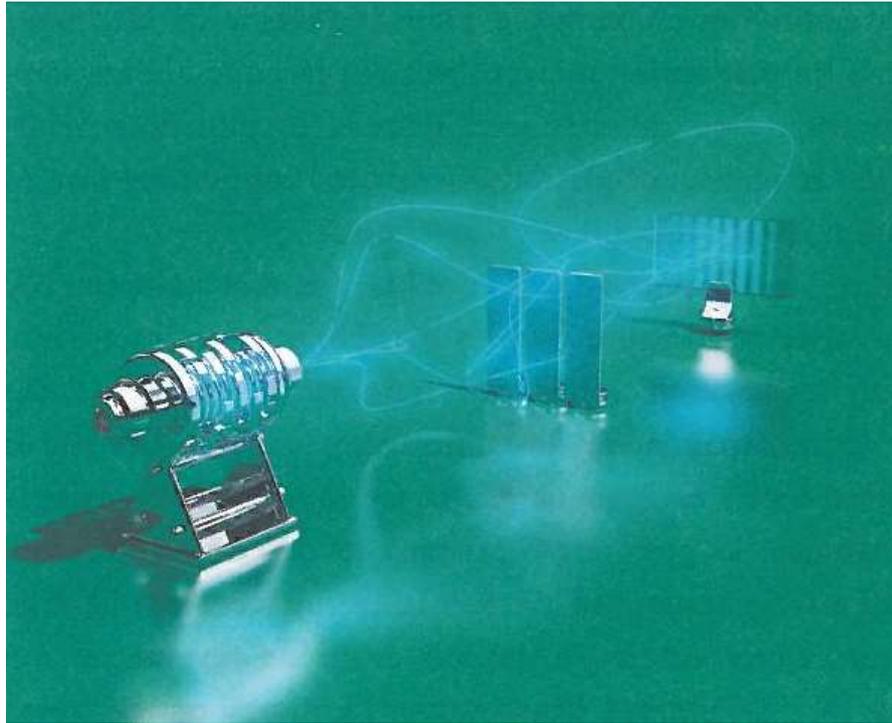
Double quasar known as QSO 0957+561, also known as the "Twin Quasar", which lies just under 9 billion light-years from Earth.



Wheeler's plan

Wheeler a proposé une version cosmique de son expérience. Dans cette expérience de pensée il se demande ce qui arriverait à la lumière émise par un quasar, ou une galaxie, à des milliards d'années lumière de la Terre, si les rayons lumineux passaient proche d'une galaxie massive qui avait sur eux un effet de lentille gravitationnelle. Un photon venant vers la Terre rencontrerait alors une distorsion de l'espace au voisinage de cette galaxie. Il devrait alors décider s'il se comporte comme une particule, suivant ainsi un chemin unique, ou bien s'il se comporte comme une onde, contournant alors par les deux côtés la galaxie placée sur son chemin. Dans le deuxième cas on pourrait observer sur Terre un phénomène d'interférence entre les deux « parties » de chaque photon. On comprend donc que selon le mode d'observation utilisé sur Terre, télescope ou système interférentiel, on pourrait décider de modifier a posteriori le choix fait par le photon plusieurs millions ou milliards d'années avant que nous l'observions.

⁸⁰ *Source de photons uniques et interférences à un seul photon. De l'expérience des fentes d'Young au choix retardé*, Vincent Jacques, Thèse de doctorat, ENS Cachan 2007



*Selon R. Feynman L'univers en physique
quantique n'a pas un passé ou une
histoire unique*

Dans le modèle quantique la particule n'a pas de position définie pendant la période comprise entre son point de départ et son point d'arrivée. Richard Feynman n'interprète pas cela comme une absence de trajectoire, mais au contraire comme le fait que la particule emprunte toutes les trajectoires possibles et ceci elle le fait simultanément. Par contre si on observe la particule, alors on réduit le paquet d'onde et on astreint la particule à passer par l'un ou l'autre des deux trous. Sans observation, sans interaction avec l'observateur, tous les possibles sont explorés simultanément. « Le passé (que nous n'avons pas observé) est, à l'instar du futur, indéfini et n'existe que comme un spectre de possibilités »⁸¹.

« L'univers en physique quantique n'a pas un passé ou une histoire unique »⁸²

⁸¹ In « Y a-t-il un grand architecte dans l'Univers ? », Stephen Hawking & Léonard Mlodinow, Ed. Odile Jacob, poche-Sciences, p 101 (2014).

⁸² *loc. cit.*

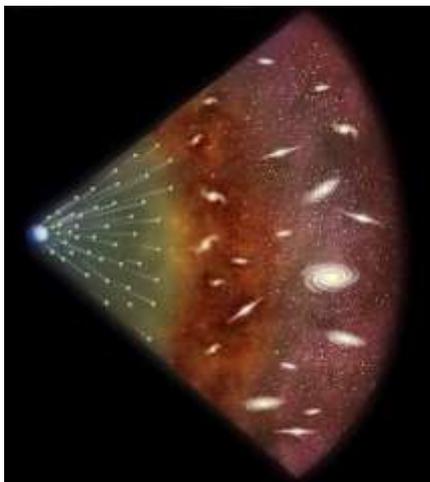
Au-delà de la physique quantique et de la relativité, au-delà du « temps » : lorsqu'on remonte l'histoire de l'univers jusqu'aux temps primordiaux des modèles physiques, jusqu'à cette singularité appelée maladroitement « big bang », on tombe sur le mur de Planck, associé à un temps caractéristique de 10^{-43} secondes, dit « temps de Planck » après la singularité, et en deçà duquel aucune théorie ne permet aujourd'hui de remonter. Pour le faire il faudrait disposer d'une théorie quantique de la gravitation. Dans l'état actuel de nos connaissances, un temps plus court que 10^{-43} secondes n'a pas de sens, il lui correspond une longueur dite « longueur de Planck » de 10^{-33} cm, au-dessous de laquelle rien n'est aujourd'hui concevable.

L'origine de l'Univers, l'origine des temps (d'après Etienne Klein)



Vue d'artiste du big bang • Crédits : kyoshino - Getty

Le mystère de l'existence : pourquoi quelque chose plutôt que rien : comment le rien peut-il devenir un monde ? Si l'on répond « il y a le Big Bang », une question vient immédiatement : les équations des cosmologistes ont-elles directement accès à l'instant marquant le surgissement de l'espace, du temps, de la matière, du rayonnement, de l'énergie...si l'on déroule le temps à l'envers, les équations font effectivement apparaître un instant critique, traditionnellement appelé « l'instant zéro » où l'espace a un volume nul, il y a 13,8 milliards d'années.

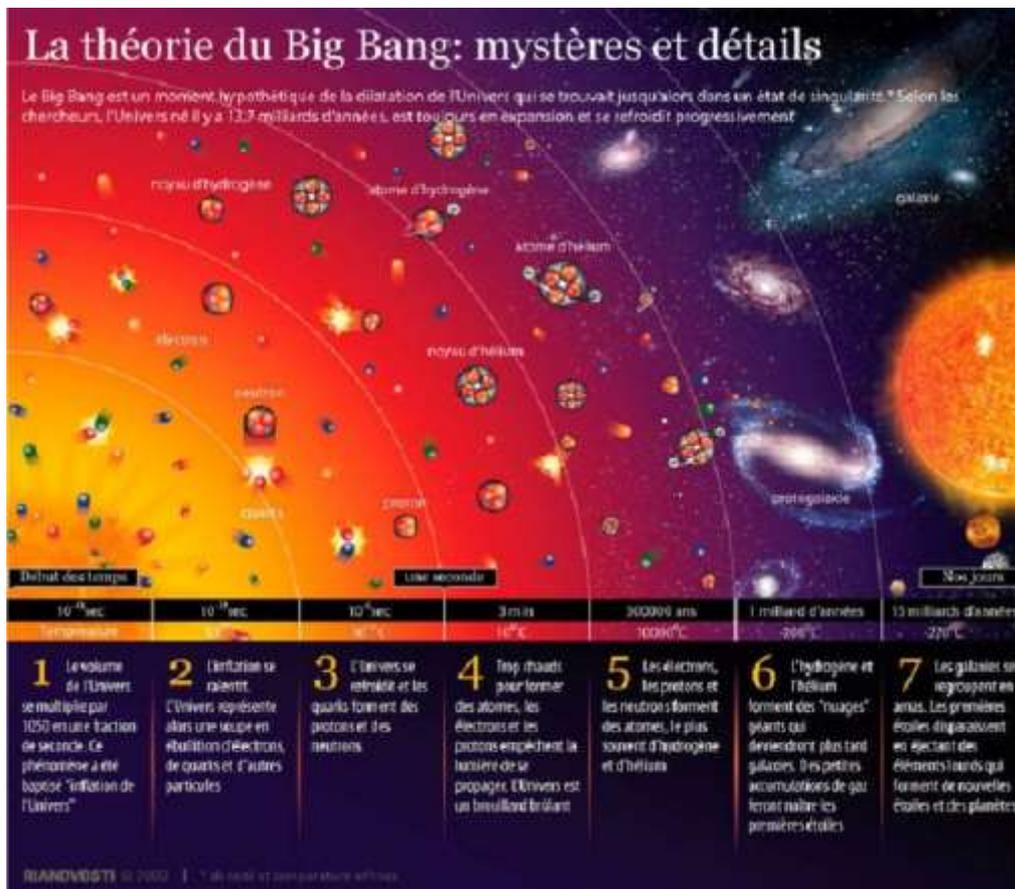


La création de l'Univers : une théorie effective

Cet instant est associé à une situation monstrueuse que l'on appelle « singularité de l'espace-temps » où certaines quantités comme la température ou la densité de matière deviennent infinies. Qu'est-ce qui empêche d'assimiler cette singularité à l'origine effective de l'Univers ? De prime abord : rien. Mais seulement de prime abord car en réalité, quand on fait cette extrapolation vers le passé, avant d'atteindre cette singularité prétendument initiale, on tombe sur une singularité physique pour laquelle les équations ne fonctionnent plus : le mur de Planck ($t_{Planck} = 5,391\ 21 \cdot 10^{-44}$ sec) au-delà de ce mur les calculs restent mathématiquement juste, mais sont physiquement faux. Afin de « franchir ce mur » les physiciens osent des hypothèses jamais encore faites : l'espace-temps posséderait plus de quatre dimensions, ou bien à toute petite échelle il serait discontinu plutôt que lisse⁸³. Ces hypothèses, qui ne sont encore que des conjectures ont la propriété de remettre en cause l'instant zéro. Pour elles il n'y a plus de singularité initiale. Ainsi aujourd'hui, d'après ces approches, on ne pourrait plus prouver scientifiquement que l'univers a eu une origine, ni qu'il n'en a pas eue. *La question de l'origine de l'univers est donc une question qui reste ouverte.*

$$t_{Planck} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}}$$

⁸³ Les paradoxes de Zénon contenaient déjà les considérations qui impliqueraient de considérer cette discontinuité de l'espace et celle du temps



Le temps a-t-il une origine ? Si oui quel est le processus de son déclenchement ? Ce processus a-t-il une durée ?

Il est intéressant de mettre ces remarques en regard de la pensée de Wang Fuzhi, lettré chinois du XVII^{ème} siècle (1619-1692),

« Il n'y a jamais eu un moment où il y a eu un existant qui puisse servir de point de départ au Procès⁸⁴, de sorte que tout le reste en soit la suite.

en amont comme en aval de lui-même, le cours du Procès n'a pas d'extrémité possible.

On ne peut reconnaître un processus que dans la mesure où il est en train d'être en processus, il n'y a de Procès qu'en Procès, et la question même de processus dissous la question de l'origine ».

Citations in « Procès ou création » de François Julien⁸⁵



⁸⁴ Procès est ici à entendre sous les sens de « processus »

⁸⁵ François Jullien, *Procès ou création: Une introduction à la pensée des lettrés chinois - Essai de problématique interculturelle*, Ed ; du Seuil, mars 1989

Dans « *La renaissance du temps* » Lee Smolin écrit : « *Implicite dans l'idée que le temps est réel et fondamental est celle que le temps ne peut pas avoir de commencement. Car si le temps possède un début, alors cette origine du temps doit être explicable en termes d'autre chose qui n'est pas le temps. Et si le temps est explicable en termes de quelque chose d'intemporel, alors le temps n'est pas fondamental et c'est cette chose, quelle que soit sa nature, d'où a émergé le temps, qui est plus fondamentale. Mais dans tout modèle plausible d'univers décrit par les équations de la relativité générale, le temps a toujours un début* »⁸⁶



© Guillaume Bonnefont / IP3 / MaxPPP

Le temps a-t-il une fin ?

Le problème de l'origine du temps ainsi que celui de son existence même peut être abordé à la façon de Stephen Hawking et Léonard Mlodinow en posant trois questions qui s'imposent lorsqu'on s'interroge sur les lois qui gouvernent la nature :

- 1) Quelle est l'origine de ces lois
- 2) Admettent-elles des exceptions, autrement-dit des miracles
- 3) Existe-t-il un seul ensemble de lois possibles ?

La deuxième de ces questions pose celle de la nature du temps : réversible ou irréversible ? Autrement-dit y-a-t-il création dans l'univers, ou reproduction du même par le même ? Et concernant l'être humain : a-t-il un libre arbitre (lorsque je sortirai de

⁸⁶ Smolin Lee, *La renaissance du temps, pour en finir avec la crise de la physique*, Dunod 2014, coll. Quai des sciences, p.75

cette pièce j'irai à droite si cela me chante, à gauche peut-être : c'est moi qui déciderai). Pourtant si le monde est régi par des lois, qui n'acceptent aucune exception, chaque particule qui constitue mon corps obéit à ces lois sans avoir le moindre choix, et si aucune exception n'est possible, alors mon corps fait de même et mon libre arbitre n'est qu'une illusion. Ce que je ressens comme libre arbitre n'est que le fruit de la complexité qui m'échappe à cause du grand nombre des particules qui me composent. Pour décrire l'être humain nous faisons appel à une *théorie effective*⁸⁷ qui le dote d'un libre arbitre et qui nous permet d'appréhender un phénomène global bien que nous soyons dans l'impossibilité de résoudre toutes les équations qui décrivent le comportement de tous les constituants élémentaires du corps humain.

Les trois questions ci-dessus, clairement posées par Stephen Hawkin, résonnent avec celles posées par d'autres penseurs et physiciens déjà bien avant lui. Ainsi, en 1891 le philosophe américain Charles Sanders Peirce écrivait-il :

*« Supposer que les lois universelles de la nature sont capables d'être appréhendées par l'esprit, sans que rien n'explique leurs formes particulières qui restent irrationnelles, est une position difficilement justifiable. Les uniformités sont précisément le genre de faits dont il faut rendre compte... La loi est par excellence une chose qui demande une raison d'être. Maintenant la seule façon possible de rendre compte des lois de la nature et de l'uniformité générale est de supposer qu'elle résultent de l'évolution »*⁸⁸.

Le philosophe Roberto Mangabeira Unger déclarait récemment :

*« Vous pouvez, à partir des propriétés de l'univers dans le présent, remonter aux propriétés qu'il pouvait avoir à son commencement. Mais vous ne pouvez pas montrer que ces propriétés sont les seules que tout univers puisse avoir... Tôt ou tard des univers pourraient avoir eu des lois entièrement différentes... Etablir les lois de la nature n'est pas décrire ni expliquer toutes les histoires possibles de tous les univers possibles. Seules une distinction relative existe entre une explication par des lois et la narration d'une séquence historique unique »*⁸⁹.

Paul Dirac lui-même écrivait en 1939 :

« Au commencement du temps les lois de la Nature étaient probablement très différentes de ce qu'elles sont maintenant. Aussi, nous devrions considérer les lois de la Nature comme

⁸⁷ En physique une théorie effective est un cadre conceptuel créé pour modéliser certains phénomènes observés sans en décrire en détail tous les processus sous-jacents

⁸⁸ Charles Sanders Peirce, *"The Architecture of Theories"*, *The Monist*, 1:2, 161-76, 1891

⁸⁹ Roberto Mangabeira Unger, *"Social Theory : Its Situation and Its Task"*, vol. 2 of *Politics*, New-York, Verso, 2004, pp179-80

*changeantes au gré des époques, plutôt que comme uniformément figées à travers tout l'espace-temps. »*⁹⁰

John Archibald Wheeler, qui proposa que le Big-Bang fût un évènement avec une série d'autres, par lesquels les lois de la physique étaient reconfigurées a écrit :
« *Il n'y a pas de loi, à l'exception de la loi qu'il n'y a pas de loi.* »⁹¹

Richard Feynman, élève de Wheeler a déclaré dans une interview :
« *Le seul domaine qui n'ai admis aucune question d'évolution est la physique. Voici les lois, disons-nous... mais comment sont-elles devenues ce qu'elles sont, aujourd'hui ?...Alors, il se peut qu'elles ne soient pas les mêmes (lois) tout le temps et qu'il y ait une question d'histoire et dévolution.* »⁹²

Ces interrogations mènent inéluctablement à la question, métaphysique de l'existence : pourquoi y a-t-il quelque chose plutôt que rien ? Question traitée dans un récent ouvrage portant ce titre⁹³. Sous l'argument d'une théorie *égalitaire* et du principe *d'indifférence des probabilités*, qui est en total accord avec la distribution microcanonique des probabilités de la physique statistique (distribution de probabilités des états pour un système qui n'échange ni énergie ni matière avec l'extérieur, ce qui est le cas de l'Univers pris dans son entièreté) les différentes configurations possibles de l'Univers ont toutes la même probabilité. Or il n'y a qu'une seule façon de ne rien y avoir et une infinité d'autres d'avoir quelque chose. Même si l'on rassemble en un seul évènement tous les possibles qu'il se passe quelque chose⁹⁴, alors dans le pire des cas cela donne une probabilité au plus d'une chance sur deux pour qu'il n'y ait rien.

⁹⁰ Paul A. M. Dirac, "The Relation Between Mathematics and Physics", Proc. Roy. Soc. Edinburgh, 59:122-29, 1939

⁹¹ Cité par James Gleick, "Genius : the life and Science of Richard Feynman", New-York, Pantheon, 1992, p.93.

⁹² Richard Feynman– Take the World from another Point of view", NOVA (PBS, 1973). Transcription à <http://calteches.library.caltech.edu/35/2/PointofView.htm>

⁹³ "Pourquoi y a-t-il quelque chose plutôt que rien ?", sous la direction de Francis Wolff, PUF, coll. MétaphysiqueS, 2013, p. 18

⁹⁴ Ibid., p. 18 ceci correspond à l'hypothèse de fécondité, qui pose toutes les possibilités comme réalisées en même temps : tout ce qui peut être est.

Nouvelles directions :

Aujourd'hui les théoriciens travaillent sur la synthèse de la relativité et de la mécanique quantique. Ils devraient parvenir à une nouvelle conception de l'espace et du temps. En effet, ces deux sciences se sont développées en s'ignorant mutuellement. La relativité ne prend pas en compte l'existence de la quantification. Pour elle la lumière est une onde électromagnétique, mais le photon n'existe pas. La mécanique quantique quant à elle a une conception du temps et de l'espace qui sont ceux de la physique de Newton : continu, de même structure à travers tout l'univers. La relativité quantique, actuellement sans confirmation expérimentale en est au stade d'une conjecture. Néanmoins ses équations se développent et à un certain stade le paramètre temps y disparaît. Les concepts de quantum d'espace (de l'ordre de 10^{-33} cm) et de quantum de temps sont les fruits de cette théorie. C'est le jeune russe, trop tôt disparu, Matveï Bronstein⁹⁵, qui donne la méthode d'évaluation de la taille du quantum d'espace : imaginons que faire pour observer une région de l'espace extrêmement petite. On y place une particule. Le principe d'indétermination de Heisenberg nous dit alors que plus le lieu de l'espace considéré est petit, plus grande est la vitesse de cette particule avec laquelle elle s'éloigne du lieu considéré. La particule est alors dotée d'une énergie d'autant plus grande que le lieu où l'on veut la confiner est petit. Lorsque la taille de ce lieu de l'espace diminue, l'énergie, donc la masse de la particule augmente sans limite, créant un trou noir dans lequel la particule disparaît. On peut alors calculer la taille minimale⁹⁶, appelée longueur de Planck, de la particule avant qu'elle tombe dans son trou noir :

$$L_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}}$$

La longueur de Planck est la très petite longueur à laquelle se produisent les phénomènes de gravité. L'espace et le temps émergent dès lors avec le grand nombre de ces quanta.

⁹⁵ Carlo Rovelli, *Par-delà le visible, La réalité du monde physique et la gravité quantique*, chap. 5, Ed. Odile Jacob 2014, coll. Sciences

⁹⁶Dans cette formule apparaissent les trois constantes universelles : $G = 6,67259 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ est la constante gravitationnelle, $\hbar = 1,0545727 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ est la constante de Planck, $c = 299792458 \text{ ms}^{-1}$ est la vitesse de la lumière, d'où $L_p = 1,61 \cdot 10^{-35} \text{ m}$. La taille du grain d'espace apparaît donc comme contrôlée par la gravité, la quantification du monde et la caractéristique relativiste au sens d'Einstein.

Remarque : dès lors qu'Einstein a démontré que le temps s'écoulait différemment dans des systèmes de coordonnées qui étaient différents, alors l'idée que « le temps pouvait ne pas exister », devenait naturelle.

Le temps reste une énigme pour les scientifiques comme pour les philosophes. La pensée qui se déploie en chacun à son sujet est indissociablement imprégnée de nos intuitions et fulgurances de compréhension. La multiplicité des conceptions qui s'affrontent est parfaitement illustrée par l'affrontement contemporain entre les deux codécouvreurs de la gravité quantique à boucle : Carlo Rovelli et Lee Smolin, alors que le premier publiait chez Dunod en 2012 « *Et si le temps d'existait pas ? Un peu de science subversive* »⁹⁷, pour second, « *Non seulement le temps est réel, mais de ce dont nous faisons l'expérience ou avons connaissance, ne saurait plus s'approcher du cœur de la nature que la réalité du temps* »⁹⁸. Pour Lee Smolin « *Chercher à unifier la physique et, particulièrement, à rassembler la théorie quantique et la relativité au sein d'un unique cadre revient principalement à achever la révolution relationnelle en physique... cela passe par l'adoption des idées que le temps est réel et que les lois évoluent* »⁹⁹.

Au total le temps nous apparaît comme un milieu à travers lequel s'écoulent les événements, dans une succession locale toute relative. Ce milieu est doté d'une sorte de viscosité qui nous le fait saisir par une certaine épaisseur qui établit le lien présent entre passé et futur, ce que Saint-Augustin décrit comme « *le présent des choses passées, le présent des choses présentes et le présent des choses futures* », à quoi Nicolas Grimaldi ajoute dans « *Le temps, la vie, l'attente* »¹⁰⁰ : « *l'évènement est du passé qui dure encore* ». Si nous abordons le problème par le biais de l'échelle il peut apparaître que le temps peut être regardé comme une propriété de l'univers qui émerge seulement à certaines échelles, notamment celle de l'être humain. Au niveau de l'atome il ne semble pas exister, ou au moins ne pas se manifester par son aspect irréversible. Certes les atomes au cours de leur existence établissent des liens, des interactions, s'engagent dans des molécules, ou bien s'en libèrent, ceci selon des processus qui se succèdent, révélant l'écoulement du temps. Cependant, on sait que les atomes ont été formés il y a 8 à 10 milliards d'années et s'ils ont subi une multitude d'aventures avant de se retrouver dans notre corps ils sont restés identiques à eux-mêmes, le temps n'ayant aucune emprise sur eux, ils sont comme éternels, en dehors du temps. Ainsi, si le temps émerge seulement, à certaines échelles, dans certains systèmes, il peut être difficile de rendre compte de son existence depuis l'intérieur de ce système. Kurt Gödel nous donne peut-être la clé de ce mystère dans l'interprétation qu'il donne lui-même de son

⁹⁷ Rovelli Carlo, *Et si le temps n'existait pas ? Un peu de science subversive*, Dunod 2012, coll. Quai des sciences

⁹⁸ Smolin Lee, *La renaissance du temps, pour en finir avec la crise de la physique*, Dunod 2014, coll. Quai des sciences, édition originale : *Time Reborn*, éd. Houghton Mifflin Hartcourt, 2013

⁹⁹ *Ibid.*, p. XXV

¹⁰⁰ Conférences de l'ENS, les lundis de la philosophie, <https://www.franceculture.fr/emissions/leloge-du-savoir/le-temps-la-vie-lattente> 30/01/2015

théorème « *dans tout système formel consistant contenant une théorie des nombres finitaires relativement développée, il existe des propositions indécidables* » et « *la consistance d'un tel système ne saurait être démontrée à l'intérieur de ce système* »¹⁰¹.

Après ces exposés aux conclusions très contrastées de la science sur le temps on aurait envie de se demander : *où est la vérité ?* Pour quelques éléments de réflexion on se reportera au complément 5 de ce document.

Pour évoquer la nature de l'apport de la science à notre compréhension de l'Univers on peut rappeler des citations de deux grands contributeurs à cette discipline, qui se connurent, s'apprécièrent au plus haut point, et dont les avis divergeaient profondément sur ce sujet :

Einstein : « *Ce que nous appelons science a pour unique but de déterminer ce qui est* ».

Bohr (1947) : « *C'est une erreur de croire que la tâche de la physique est de découvrir comment est la nature. La physique traite de ce que nous pouvons dire de la nature* ». On pourra se reporter au livre de Manjit Kumar « *Le grand roman de la physique quantique, Einstein, Bohr... et le débat sur la nature de la réalité* »¹⁰², qui retrace largement les débats entre les fondateurs de la physique quantique.

Des travaux prometteurs :

Inspiré par la relation d'indétermination de Heisenberg, Alain Connes a développé un travail de la toute première importance sur la géométrie non commutative et les algèbres de von Neumann. Il a proposé un nouveau paradigme géométrique, plus générale que celui de Riemann sur lequel est fondé la relativité générale. Ce nouveau paradigme permet plus de liberté et donne une structure fin de l'espace-temps. Grâce à ce paradigme on peut comprendre pourquoi on n'a pas seulement la force gravitationnelle, mais que celle-ci est associée aux autres forces : la force électromagnétique, la force faible et la force forte, tout cela avec une très grande précision. Il reste à établir le lien entre le temps complexe qui apparaît dans ce paradigme, et le temps cosmologique. Selon Alain Connes écrire la physique en fonction du temps est probablement une erreur, la véritable variabilité serait plus profonde et quantique. Le temps quant à lui émerge à partir de notre méconnaissance de tous les détails quantiques. Il émerge de l'aléa du quantique qui présente une évidente cohérence, comme par exemple dans les phénomènes d'intrication.

¹⁰¹ Cité in *Le théorème de Gödel*, Ernest Nagel, James R. Newman, Kurt Gödel et Jean-Yves Girard, préface par Thierry Marchaise, Ed. Seuil, Coll. Sources du savoir, 1989

¹⁰² *Le grand roman de la physique quantique, Einstein, Bohr... et le débat sur la nature de la réalité*, Manjit Kumar, Flammarion, coll. Champs sciences, 2012, titre original : *Quantum*, publié par Icon Books, 2008

Compléments

2. Lecture

« Tout au début, au big bang, notre tout est encore presque rien, il est minuscule, plus petit qu'une tête d'épingle, qu'un grain de sable, qu'une poussière invisible à l'œil nu. Mais il y a déjà du gigantesque en lui : la température, la densité, l'énergie. Et tout l'avenir du monde. Le chêne est déjà dans le gland. L'être tout entier est déjà dans l'enfant, dans le fœtus, dans la rencontre du spermatozoïde et de l'ovule. Et l'invention de l'écriture, les conquêtes d'Alexandre, la fin de l'Empire romain, la destruction de Bagdad par les Mongols d'Hulagu, la prise de la Bastille, la révolution russe, la chute du mur de Berlin, et vous et moi sommes déjà dans le big bang.

Dix milliards d'années après le big bang, quand, pour une raison ou une autre, la vie a surgie sur la Terre, l'univers est déjà immense. Les galaxies se sont éloignées les unes des autres et dans un coin perdu de l'une de ces galaxies naissent coup sur coup ces choses familières et étranges : la vie, les différentes espèces, les primates, les hommes, la pensée.

Dès que l'homme apparaît, il y a quelques centaines de milliers d'années à peine, la complexité du tout fait un bon prodigieux. Les sentiments, la mémoire, l'imagination, la pensée, plus tard la parole, plus tard encore l'écriture et l'électronique multiplient indéfiniment les formes diverses de la réalité. Les livres sont innombrables, mais en nombre limité. Les paroles sont presque illimitées, les sentiments des êtres humains et leurs songes le sont tout à fait.

Il y a toujours plus dans le monde que tout ce que vous pouvez imaginer. Plus d'espace autour de vous toujours en train de s'augmenter, plus de temps derrière et aussi devant vous, plus de passions et plus de rêves dans le cœur des humains. Les créateurs, même de génie, ressentent ce décalage avec un mélange d'orgueil et de désespoir. Quand Léonard peint *La Joconde*, quand Mozart achève *Don Juan*, quand Dante écrit *La Divine Comédie*, ils savent, bien sûr, qu'ils sont en train d'ajouter à la création un chef-d'œuvre qui traversera les temps. Mais ils savent aussi qu'ils ne laissent derrière eux, quelques sublimes qu'ils puissent être, qu'un tableau, qu'un opéra, qu'un livre de plus parmi beaucoup d'autres ». ¹⁰³

Jean d'Ormesson¹⁰⁴

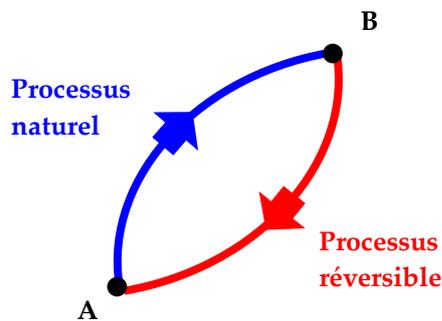
¹⁰³ In *C'est une chose étrange à la fin que le monde*, « *Un monde inépuisable* », Jean d'Ormesson, Robert Laffont, 2010

¹⁰⁴ Pour une partie importante de son œuvre, Jean d'Ormesson dit trouver son inspiration dans « *Les deux cultures* », de Charles Percy Snow

COMPLEMENTS

3. La notion d'entropie

Soit un système isolé soumis à une transformation cyclique $A \rightarrow B \rightarrow A$ constituée d'une transformation $A \rightarrow B$ réelle (donc irréversible) et d'une transformation $B \rightarrow A$ réversible (donc idéale)



D'après Clausius sur ce cycle on a :

$$I = \oint \frac{\delta Q}{T} < 0$$

Cette intégrale se transforme en :

$$I = \int_A^B \frac{\delta Q}{T} + \int_B^A \frac{\delta Q}{T} < 0$$

(réelle) (réversible)

car le cycle est irréversible.

En conséquence :

$$\int_A^B \frac{\delta Q}{T} < \int_B^A -\frac{\delta Q}{T} = \int_A^B \frac{\delta Q}{T} = \Delta S$$

(réelle) (réversible) (réversible)

L'équation :

$$\int_A^B \frac{\delta Q}{T} = \Delta S$$

réversible

définie **l'entropie**, grandeur d'état dont la variation caractérise l'irréversibilité d'une transformation

Si le système est isolé alors $\delta Q_{réelle} = 0$ et il n'y a pas, par définition, d'échange d'énergie avec l'extérieur. Donc :

$$\int_A^B \frac{\delta Q}{T} = 0 < \Delta S$$

(réelle)

D'où $\Delta S > 0$ pour toute transformation d'un système isolé. C'est le cas de l'univers qui va vers un désordre croissant et sa « mort thermique » selon le mot de Clausius.

Le « Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences » (sous la direction de Dominique Lecourt, PUF, 2003) dit : « L'entropie correspond au contenu de transformation d'un corps », c'est-à-dire à sa capacité de subir des transformations spontanées. Plus grande est la valeur de l'entropie d'un corps, plus faible est la capacité du corps à se transformer et plus élevée est son niveau de désagrégation¹⁰⁵ ».

¹⁰⁵ Clausius dans son mémoire intitulé « *Sur l'application du principe de l'équivalence des transformations au travail intérieur* », paru en 1862, essaye de mieux définir l'effet de la chaleur sur les corps en introduisant une nouvelle grandeur nommée désagrégation. Il écrit : « l'action de la chaleur tend toujours à diminuer la cohésion des molécules, et lorsque celle-ci est vaincue, à accroître leur distance moyenne. Pour pouvoir exprimer mathématiquement ce fait, nous représenterons le degré de division du corps par une nouvelle quantité que nous nommerons la *désagrégation* du corps, et au moyen de laquelle nous pouvons définir l'action de la chaleur en disant simplement *qu'elle tend à augmenter la désagrégation* ».

En 1865, dans son mémoire récapitulatif *Sur diverses formes des équations fondamentales de la théorie de la chaleur...* Clausius accomplit le dernier pas de son analyse et unifie la valeur de transformation d'un corps et son niveau de désagrégation par la grandeur qu'il appelle « entropie »¹⁰⁶. Il écrit ainsi : « Je préfère emprunter aux langues anciennes les noms des quantités importantes afin qu'ils puissent rester les mêmes dans toutes les langues vivantes ; je proposerai donc d'appeler la quantité S l'*entropie* du corps, d'après le mot grec η' τροπή', transformation. C'est à dessein que j'ai formé ce mot *entropie* de manière qu'il se rapproche autant que possible du mot *énergie* ; car ces deux quantités ont une telle analogie dans leur signification physique qu'une certaine analogie de désignation m'est apparu utile. »

¹⁰⁶ « Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences » sous la direction de Dominique Lecourt, PUF, 2003

COMPLEMENTS

4. L'expérience des muons

<https://www.dailymotion.com/video/x2u111x>

L'influence de la vitesse sur le temps

Rappelons que si la vitesse de la lumière est une constante quel que soit le référentiel (Cf. les expériences du prisme mobile d'Arago en 1810 et l'expérience d'Alvåger réalisée au CERN en 1964), cela signifie que d'autres paramètres varient, notamment le temps.

En effet, si Einstein utilisa les mêmes équations que Lorentz, son interprétation des variables de vitesse et de temps introduisit des concepts totalement originaux. Deux exemples concrets permettent de saisir la relation qui les relie : L'expérience du voyageur de Langevin (le paradoxe des jumeaux) et le battement des horloges relativistes.

L'expérience des muons

Il existe dans le rayonnement cosmique une particule intermédiaire du point de vue de la masse entre le proton et l'électron, le muon (un lepton anciennement appelé méson- μ). Si l'électron est pris comme unité, le proton "pèse" $1840 m_e$ et le muon $207 m_e$.

La durée de vie du muon est très courte, c'est une particule instable. Elle vit 1.56 microsecondes environ, après quoi elle se désintègre [6]. Cette particule se déplace à une vitesse voisine de celle de la lumière ($0.989c$) mais on peut la ralentir jusqu'à quelques mètres par seconde lorsqu'elle est associée à un atome d'hydrogène muonique (cela intéresse les physiciens dans le cadre de la fusion à basse température). Dans ces conditions, par rapport à la vitesse de la lumière on dit que le muon est au repos, mais c'est un abus de langage.

Si même cette particule se déplaçait à la vitesse de la lumière, selon Newton elle ne parcourrait que 450 mètres durant sa courte vie. En effet, $300000 \times 1.5 \times 10^{-6} = 0.45$ km. Or ce n'est pas ce que nous observons en réalité.

Bruno Rossi et David B.Hall de l'Université de Chicago ont réalisé la première expérience en 1941 (*Physical Review*, 59, p223-228). Ils ont mesuré le flux des muons (alors appelés mésotrons) au sommet du Mont Washington dans le New Hampshire aux Etats-Unis, à environ 2000 m d'altitude ainsi qu'à la base de la montagne. En considérant une demi-vie de 1.56 microsecondes, ils ont observé qu'il y avait 1.4 fois

plus de muons au sommet du Mont Washington que dans la vallée alors que les lois classiques prédisent qu'il devrait y en avoir 22.3 fois plus en altitude.

En d'autres circonstances, on constate que malgré les nombreuses décroissances, au bout de 10 km on en détecte des milliers de fois plus que la théorie classique le prévoit (49 000 contre 0.3 par million) et ils parcourent une distance 10 à 100 fois plus longue que la théorie le prévoit avant de se désintégrer.

Cette modification apparente de l'écoulement du temps ne pouvait s'expliquer que si les muons voyageaient à la vitesse de $0.994c$. Par la suite l'équipe de Bailey réalisa une expérience similaire au CERN en propulsant des muons à $0.9994c$. Ils découvrirent que leur durée de vie était 29.3 fois supérieure à leur durée de vie normale dans un laboratoire. Comment peut-on réconcilier la théorie avec l'expérience ? En faisant appel à la théorie d'Einstein. Explications.

COMPLEMENTS

5. Paradoxe d'Achille et de la tortue

https://fr.wikipedia.org/wiki/Paradoxe_d%27Achille_et_de_la_tortue

D'après un article de Wikipédia, l'encyclopédie libre.

Le **paradoxe d'Achille et de la tortue**, formulé par [Zénon d'Élée](#), dit qu'un jour, le héros grec [Achille](#) a disputé une course à pied avec le lent reptile. Comme Achille était réputé être un coureur très rapide, il avait accordé gracieusement à la [tortue](#) une avance de cent mètres.

L'argument exposé par Zénon est que Achille ne peut rattraper la tortue car si la tortue a de l'avance sur Achille, celui-ci ne peut jamais la rattraper, quelle que soit sa vitesse ; car pendant qu'Achille court jusqu'au point d'où a démarré la tortue, cette dernière avance, de telle sorte qu'Achille ne pourra jamais annuler l'avance de l'animal.

Cet argument fautif, sans doute possiblement déjà considéré comme tel par Zénon, ou *pseudo-Zénon*, car exposé comme un [paradoxe](#), est totalement résolu par les mathématiques contemporaines : **Achille dépasse bien la tortue**, et même, il existe un instant auquel ils sont exactement à la même position.

Argument énoncé par Zénon

[Zénon d'Élée](#) affirme donc que le rapide [Achille](#) n'a jamais pu rattraper la tortue^{1,2}.

En effet, supposons pour simplifier le raisonnement que chaque concurrent court à vitesse constante, l'un très rapidement, et l'autre très lentement ; au bout d'un certain [temps](#), Achille aura comblé ses cent mètres de retard et atteint le point de départ de la tortue ; mais pendant ce temps, la tortue aura parcouru une certaine distance, certes beaucoup plus courte, mais non nulle, disons un mètre. Cela demandera alors à Achille un temps supplémentaire pour parcourir cette distance, pendant lequel la tortue avancera encore plus loin ; et puis une autre durée avant d'atteindre ce troisième point, alors que la tortue aura encore progressé. Ainsi, toutes les fois qu'Achille atteint l'endroit où la tortue se trouvait, elle se retrouve encore plus loin. Par conséquent, le rapide [Achille](#) n'a jamais pu et ne pourra jamais rattraper la tortue.

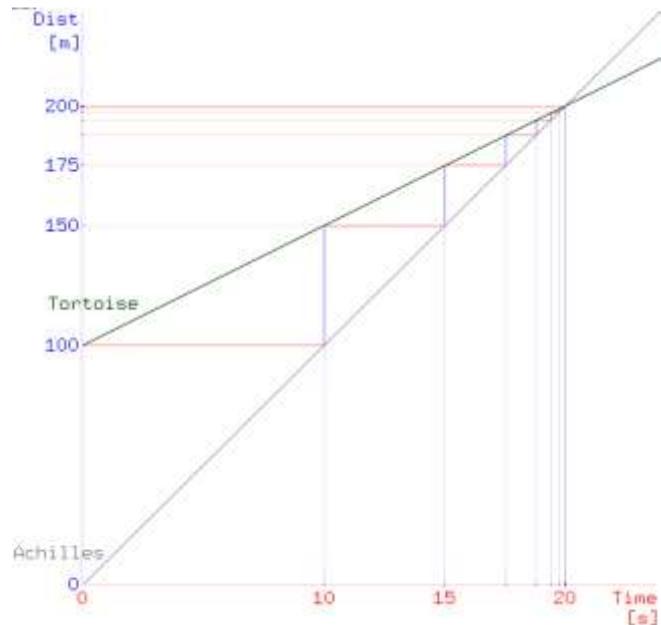
Résolution du paradoxe

Pour simplifier la résolution, on choisit arbitrairement les valeurs suivantes : Achille se déplace à 10 m/s (proche du [record du monde du 100 mètres](#) au XX^e siècle), la tortue à 5 m/s (peu vraisemblable mais rend le graphique plus lisible) et la tortue a 100 mètres d'avance sur Achille.

Avec une série

Dans le paradoxe de Zénon, on calcule la durée de l'événement « Achille rattrape la tortue » en additionnant tous les événements de type « Achille parcourt la distance jusqu'à la position actuelle de la tortue ». Or, ces durées sont de plus en plus petites, mais jamais égales à zéro, et leur nombre est infini.

L'erreur mathématique était de dire « donc Achille ne rattrape jamais la tortue », car l'analyse moderne démontre qu'une [série infinie](#) de nombres strictement positifs peut [converger](#) vers un résultat fini.



Avec les vitesses 10 m/s pour Achille et 5 m/s pour la tortue, la première étape prend 10 secondes, la suivante 5 secondes et on obtient la [série](#) suivante : $T = 10 + 5 + 2,5 + + 1,25 + \dots$. Finalement, la durée exacte est : 20 secondes.

En mathématiques plus formelles, la somme des étapes s'écrit sous cette forme :

$$T = \sum_{n=0}^{+\infty} 10 \cdot (0,5)^n$$

C'est la somme d'une [série géométrique](#). On utilise le résultat général : La série géométrique réelle de terme initial $a \in \mathbb{R}$ non nul et de raison $q \in \mathbb{R}$ est convergente si et seulement si $|q| < 1$. Dans ce cas, sa somme vaut :

$$\sum_{n=0}^{+\infty} aq^n = \frac{a}{1 - q}$$

Et on trouve ici :

$$T = \frac{10}{1 - 0,5} = 20$$

Équivalence graphique

Le graphique plus haut donne les positions respectives d'Achille et de la tortue dans le cas où Achille se déplace à 10 m/s et la tortue à 5 m/s (peu vraisemblable mais rend le graphique plus lisible).

La somme de l'infinité des termes de la série revient à suivre les lignes verticales rouges et horizontales bleues jusqu'à trouver un point de rencontre. La résolution de l'équation revient à chercher directement l'intersection des lignes « Achille » et « tortue ».

Sur l'existence de l'infiniment petit[[modifier](#) | [modifier le code](#)]

On notera aussi qu'à travers ce paradoxe, existe une volonté de montrer que l'infiniment petit n'existe pas. Pensée également partagée par [Démocrite](#), l'inventeur de la notion d'[atome](#). La [physique quantique](#) va elle aussi dans ce sens en admettant l'existence d'une unité de temps et d'une unité de taille toutes deux indivisibles — approximativement 10^{-44} secondes et 10^{-35} mètres ([unités de Planck](#)).

Si on utilise cette limite, il n'est plus possible de découper en une infinité d'étapes : on additionne donc un nombre fini de durées finies (non infiniment petites), et le total est une durée finie. Cependant, la résolution mathématique démontre bien que la durée reste finie même en acceptant le découpage en une infinité d'étapes, et donc cet exercice de pensée ne réfute pas l'existence de l'infiniment petit.

Notes et références[[modifier](#) | [modifier le code](#)]

- ↑ [Aristote](#) (trad. [Jules Barthélemy-Saint-Hilaire](#)), *Physique*, Paris, [Ladrange](#), Durand, 1862, « [Livre VI, chapitre 14 \[archive\]](#) » : « Le second sophisme de Zénon est celui qu'on appelle l'Achille. Il consiste à dire que jamais le plus lent, quand il est en marche, ne pourra être atteint par le plus rapide, attendu que le poursuivant doit, de toute nécessité, passer d'abord par le point d'où est parti celui qui fuit sa poursuite, et qu'ainsi le plus lent conservera constamment une certaine avance. » (IV^e siècle av. J.-C.)
 - ↑ (en) [Simplicius](#) (trad. David Konstan), *On Aristotle Physics 6*, Londres, [Bloomsbury](#), 1989 (ISBN 978-0-7156-2217-9), « [1014-1015 \[archive\]](#) » (vers 533-538 ap. J.-C.)
- [La Physique VI:9, 239b15, Aristote](#)
 - [Texte original dans « La Physique » d'Aristote \(voir §4 visible au debut de l'écran\)](#)
 - [Paradoxes de Zénon](#)
 - [Paradoxe de la flèche](#)
 - [What the Tortoise Said to Achilles](#)

COMPLEMENTS

6. La vérité ?

Il y a-t-il un sens à se demander si la science nous parle de vérité ou nous permet d'atteindre La vérité ?

Une approche par la logique donne un premier élément de réponse : considérons l'affirmation « *la vérité n'existe pas* ». Si cette affirmation est vraie, alors elle est fausse.

« *Les concepts physiques sont des créations libres de l'esprit humain, et ne sont pas, comme on pourrait le croire, uniquement déterminés par le monde extérieur. Dans l'effort que nous faisons pour comprendre le monde, nous ressemblons quelque peu à l'homme qui essaie de comprendre le mécanisme d'une montre fermée. Il voit le cadran et les aiguilles en mouvement, il entend le tic-tac, mais il n'a aucun moyen d'ouvrir le boîtier. S'il est ingénieux il pourra se former quelque image du mécanisme, qu'il rendra responsable de ce qu'il observe, mais il ne sera jamais sûr que son image soit la seule capable d'expliquer ses observations. Il ne sera jamais en état de comparer son image avec le mécanisme réel, et il ne peut même pas se représenter la possibilité ou la signification d'une telle comparaison. Mais le lecteur croit certainement qu'à mesure que ses connaissances s'accroîtront, son image de la réalité deviendra de plus en plus simple et expliquera des domaines de plus en plus étendus de ses impressions sensibles. Il pourra aussi croire à l'existence d'une limite idéale de la connaissance que l'esprit humain peut atteindre. Il pourra appeler cette limite idéale la vérité objective¹⁰⁷ ».*



Ceci n'est pas une pipe de René Magritte. Exposition Magritte, La trahison des images. Du 21/09/ 2016 au 23/01/2017 (Centre Georges Pompidou, Paris)

¹⁰⁷ In *L'évolutions des idées en physique* A. Einstein et L. Infeld, Petite Bibliothèque Payot, pages 34-35

COMPLEMENTS

7. Les transformations de Lorentz¹⁰⁸

On considère deux systèmes de coordonnées, ici dans un espace à une dimension : $K (O, x, t)$ et $K' (O', x', t')$, le second étant en translation rectiligne et uniforme par rapport au premier.

Un signal lumineux qui avance le long de l'axe x se propage selon l'équation :

$$x = ct$$

ou :

$$x - ct = 0 \quad (1)$$

Puisque le signal lumineux se propage aussi à la vitesse c dans le repère $K' (O', x', t')$, on pourra écrire :

$$x' - ct' = 0 \quad (2)$$

Les points spatio-temporels (événements) qui satisfont à l'équation (1) doivent satisfaire à l'équation (2). Ceci sera manifestement le cas si la relation

$$x' - ct' = \lambda(x - ct) \quad (3)$$

est généralement satisfaite, où λ désigne une constante ; car, d'après (3), la disparition de $(x - ct)$ entraîne la disparition de $(x' - ct')$.

Une considération tout à fait analogue appliquée à un signal lumineux se propageant en sens inverse amène à écrire :

$$x' + ct' = \mu(x + ct) \quad (4)$$

Par addition ou soustraction de (3) et (4) on obtient :

$$\begin{cases} x' = ax - bct \\ ct' = act - bx \end{cases} \quad (5)$$

Où :

$$a = \frac{\lambda + \mu}{2}$$

Et

$$b = \frac{\lambda - \mu}{2}$$

Pour l'origine O' du repère $K' (O', x', t')$, on a : $x' = 0$ et donc d'après (5) la coordonnée spatiale de point dans le repère (O, x, t) est :

$$x = \frac{bc}{a}t$$

On en déduit l'expression de sa vitesse dans le repère $K (O, x, t)$:

¹⁰⁸ Démonstration d'après Albert Einstein, in *La relativité*, traduction de Maurice Solovine, © Copyright 1956

$$v = \frac{bc}{a} \quad (6)$$

On trouverait la même vitesse de déplacement par rapport à K de n'importe quel autre point de K'.

D'après le principe de relativité la longueur, dans le système K, d'une règle de mesure unité, qui est au repos relativement à K', doit être exactement la même que celle, dans le système K', d'une règle de mesure unité qui est au repos relativement à K. Pour voir comment se présentent, dans le système K, les points de l'axe des x' , nous n'avons qu'à prendre un « instantané » de K' et de K ; cela signifie que nous devons introduire pour t (temps de K) une valeur déterminée, par exemple $t = 0$. De la première des équations de (5) on obtient pour cette valeur :

$$x' = ax$$

Les variations de x et x' (qui représentent des distances entre points, sont reliées par la relation obtenue par différentiation de l'équation ci-dessus qui devient :

$$\Delta x' = a\Delta x$$

Si deux points sont distants de la longueur unité dans K' (c'est-à-dire $\Delta x' = 1$), dans K ils sont séparés sur notre instantané de

$$\Delta x = \frac{1}{a} \quad (7)$$

Mais si on prend l'instantané dans K' ($t' = 0$), on obtient de (5), en éliminant t et en tenant compte de (6),

$$x' = a\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)x \quad (7')$$

On en déduit que deux points séparés de la distance unité dans K, ont une distance dans K' de :

$$\Delta x' = a\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \quad (7a)$$

Comme les deux instantanés doivent être identiques, Δx dans (7) doit être égal à $\Delta x'$ dans (7a), de sorte qu'on a :

$$a^2 = \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (7b)$$

Les équations (6) et (7b) permettent de déterminer les constantes a et b , en les reportant dans (5) on obtient :

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$t' = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Qui représente la célèbre transformation de Lorentz

Comment se transforment les longueurs ?

Repartons de (7') $x' = a \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) x$

Deux points distants de Δx dans K seront distants de $\Delta x'$ dans K'

$$\Delta x' = a \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \Delta x \text{ soit } \ell' = a \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \ell$$

Avec $a^2 = \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ il vient :

$$\ell' = \ell \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Que vaut dans K' une durée Δt de K ? Repartons de :

$$t' = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Pour l'origine O ($x = 0$) de K par exemple il vient :

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

COMPLEMENTS

8. *L'espace-temps est quantique*¹⁰⁹

L'équation de Wheeler-DeWitt est une équation des orbitales de la relativité générale. Cette équation, simplifiée par Abhay Ashtekar dont Lee Smolin et Ted Jacobson ont montré que les solutions dépendaient de lignes fermées de l'espace, c'est-à-dire de boucles. Ce fut la première étape vers la naissance de la *gravité quantique à boucle*.

Einstein a montré que le volume d'espace est une variable du champ gravitationnel, c'est « la quantité de champ gravitationnelle présente » dans l'espace considéré. Or le champ gravitationnel est une quantité physique, donc est soumis aux règles de la mécanique quantique. Elle ne peut donc prendre qu'une liste de valeurs discrètes, appelée « spectre du volume ». La méthode pour calculer ce spectre est celle donnée par Dirac, et a abouti dans les années 1990.

La description de l'espace donnée par Einstein est donc celle du champ gravitationnel, et les quanta du champ gravitationnel sont des quanta d'espace.

¹⁰⁹ D'après Carlo Rovelli, *Par-delà le visible, La réalité du monde physique et la gravité quantique*, chap. 5, Ed. Odile Jacob 2014, coll. Sciences

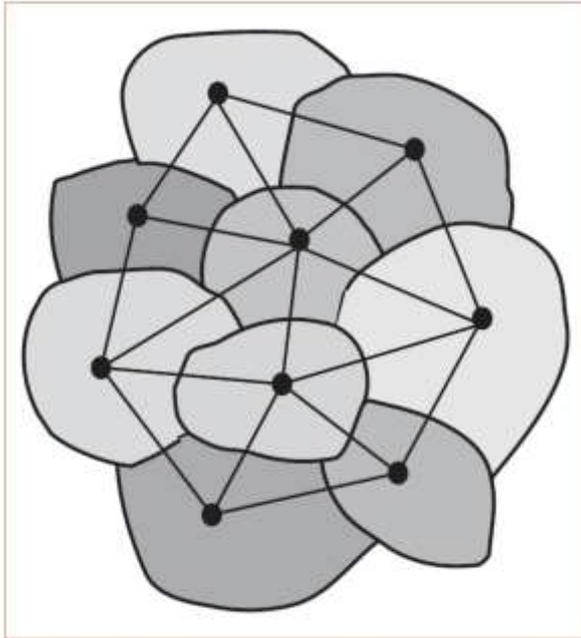
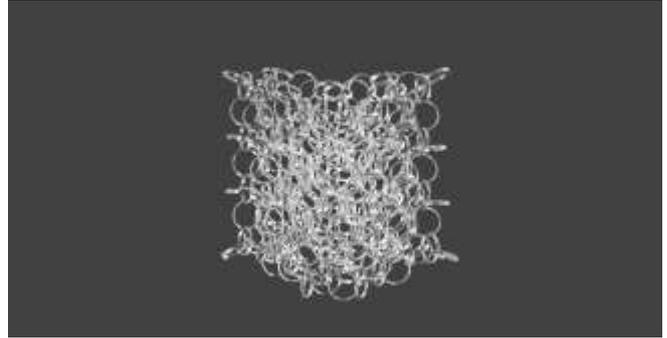


Figure 1 – Représentation d'un état du champ gravitationnel dans la théorie des boucles : un réseau de spin et les « grains », ou « quanta » d'espace correspondantes, avec en leur centre les nœuds du réseau.

$$L_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 10^{-35} \text{ m}$$

C. Le temps : introduction par les arts

« Ce monde inépuisable, il n'existe que deux voies pour tenter d'en rendre compte : l'art et la science ».

Jean d'Ormesson

C'est une chose étrange à la fin que le monde

« *L'art naît de contraintes,
vit de luttes,
meurt de libertés* »

André Gide

(*Prétextes*, «L'Évolution du théâtre», *Essais critiques*, p. 437)

« Nous savons désormais que la créativité est liée à l'irréversibilité, à la brisure de symétrie temporelle, par laquelle l'avenir et le passé jouent des rôles différents (...) La vie n'est possible que tournée vers le futur. Une telle projection atteint son paroxysme chez l'être humain. Jamais satisfait par l'instant présent, il ressent le futur comme absence. Mais il doit se consoler à l'idée que le futur est également innovation. De toute évidence, la temporalité est sa dimension existentielle fondamentale. C'est elle qui l'incite à dépasser le présent et à se projeter dans l'avenir, tel « l'homme qui marche »¹¹⁰.

Ilya Prigogine

¹¹⁰ Ilya Prigogine et Isabelle Stengers, op. cit.

Depuis la théorie de la relativité d'Einstein...

« ...Les seuls concepts vraiment scientifiques sont ceux liés à la géométrie de l'espace-temps ! » a rappelé le mathématicien René Thom. Henri Bergson a fait remarquer à plusieurs reprises que le temps spatialisé est en réalité la quatrième dimension de l'espace.

L'étude du mouvement, qui selon Aristote était le temps, peut définir une perception de la quatrième dimension dans les arts visuels.

De même l'étude de la simultanéité, multipliée à l'infini par l'artiste new yorkais Dan Graham avec ses *TIME DELAY*, peut en définir une deuxième.



La maîtrise de l'instantanéité et de sa mémoire
fit un pas décisif grâce à l'apport de la
photographie

LE MOUVEMENT REPRÉSENTÉ

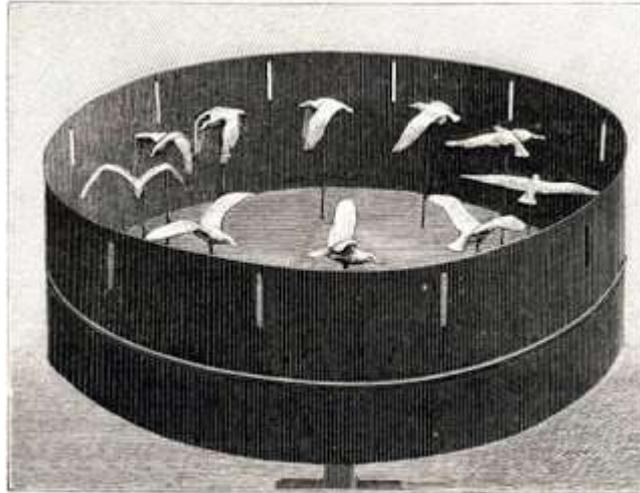


Course de chevaux à Epsom, Théodore Géricault, 1821

L'étude du mouvement, qui selon Aristote était le temps, peut définir une perception de la quatrième dimension dans les arts visuels.



MAREY Etienne-Jules (1830-1904), *L'envol du goéland*, moulage de plâtre, 1887.



MAREY Etienne-Jules (1830-1904), *L'envol du goéland*, zootrope avec 10 statuettes restituant les attitudes successives du vol, 1887.



Pélican, Étienne-Jules Marey, vers 1882



Dynamisme d'un chien en laisse, Giacomo Balla, 1912



EUGÈNE DELACROIX
Le 28 juillet ; la Liberté guidant le peuple 1830
Huile sur toile. 2,60 x 3,25
Musée du Louvre, Paris



Le tableau d'Eugène DELACROIX est de composition mobile, par la répétition de ses obliques et sa composition en pyramide.

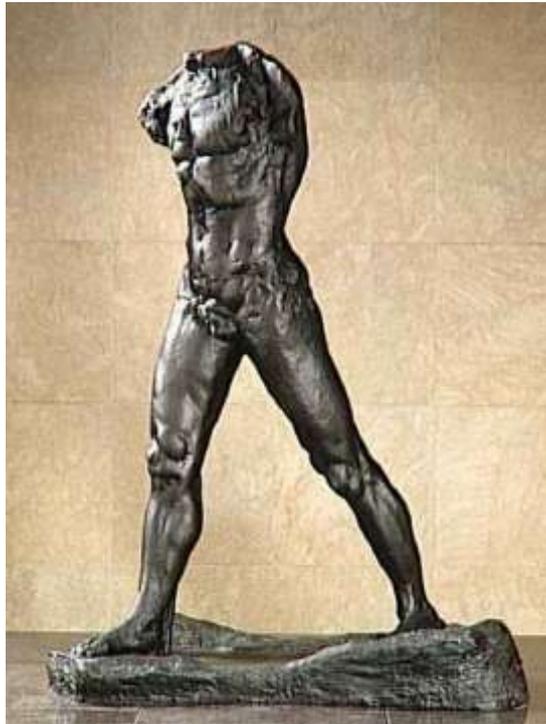


Georges SEURAT, Un dimanche après-midi à l'île de la grande Jatte, 1885, 2 m 05 x 3 m 08



Le tableau de Seurat est de composition immobile par ses lignes horizontales et ses lignes verticales.

Le mouvement



L'Homme en marche 1877 – Auguste Rodin (1840-1917)



Un homme en marche – Alberto Giacometti (1901-1966)



BOCCIONI Umberto (1882-1916), *Formes uniques de continuité dans l'espace* ou *L'Homme en mouvement*, 1913, bronze (fonte de 1972), 117,5x87,6x36,8 cm, Londres, Tate Gallery.



Discobole Lancellotti, marbre, H. 1,55 m, copie romaine, vers [120 ap. J.-C.](#) (original : [450 av. J.-C.](#)) , [Rome](#), [palais Massimo alle Terme](#).
Le mouvement figé dans le marbre



DUCHAMP Marcel (1887-1968), Nu descendant un escalier, n°2, 1912, huile sur toile, 146x89 cm, Philadelphia Museum of Art.



Violoniste en mouvement

Encre sur papier de 300 grammes de format 36cm x 48cm

Jean-Luc LOPEZ

L'art du mouvement



Une photographie hypnotisante



Mouvement ou éternelle immobilité ?





[Andrée Mathieu-Coron](#) , *Le mouvement*

La vitesse



Turner, *Pluie, vapeur, vitesse*, 1844
Huile sur toile, 91 x 122 cm, Londres, Tate Gallery



Speed – Robert Demachy (1903)

Le temps allégorique



Philippe de Champaigne, *Vanité/Vanity* (1602-1674)

Memento mori

« rappelles-toi que tu vas mourir », pensée développée
avec le christianisme médiéval

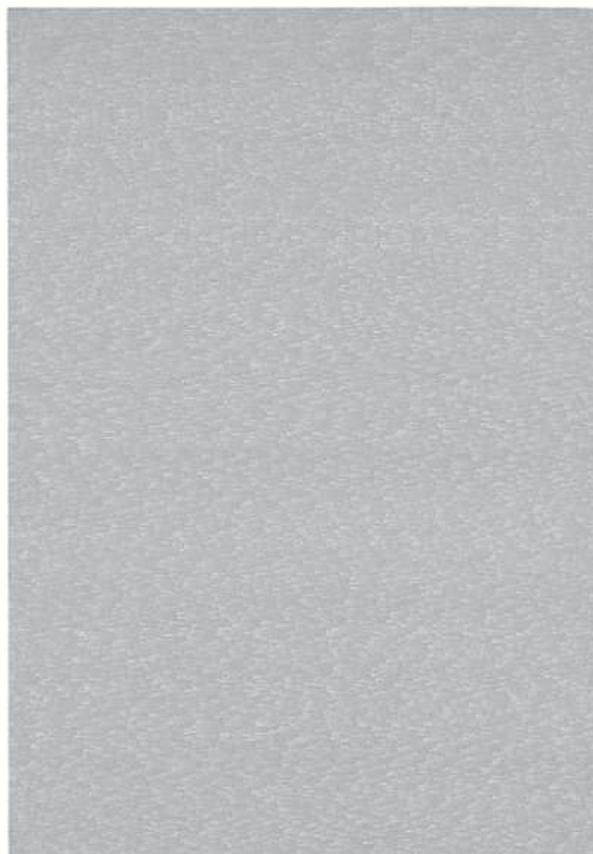
Le temps symbolique :



*le destin chez **Brueghel l'Ancien** avec
« Le triomphe de la Mort » (le Prado-Madrid)*



Détail de l'œuvre: Roman Opalka *OPALKA 1965 / 1 - ∞ Détail 1-35327* Tempera sur toile Courtesy of Roman Opalka and Museum Sztuki



Roman Opalka *OPALKA 1965 / 1 - ∞ Détail 993460 - 10178751* Acrylique sur toile Courtesy of Roman Opalka and Lévy Gorvy Gallery

Les Détails (d'après Wikipedia)

À partir de 1965, année du 1, il peint, en majorité sur un format d'échelle humaine, (196 × 135 cm). Il peint en blanc sur fond noir, les nombres qui se succèdent sans relâche et sans fin : 1, 2, 3, 4, 5, etc. Chaque nombre représente un instant, une trace irréversible du temps.

En s'engageant dans son premier tableau (OPALKA 1965 / 1 - ∞ *Détail 1-35327*), l'artiste a réduit les moyens plastiques à l'essentiel. Il choisit volontairement de réduire sa palette au noir et blanc. Il s'engage à cet instant consciemment pour toute sa vie dans une seule et unique voie, et alors que l'on pourrait penser qu'il s'installe dans une monotonie, l'artiste répond qu'au contraire, il est l'artiste qui logiquement fait à chaque nombre, quelque chose de réellement différent. À juste titre, pour lui, rien ne se répète jamais (si ce n'est les chiffres composant les nombres)⁷.

Arrivé au nombre « 1 000 000 », en 1972, il décide de faire évoluer son travail. Dès lors, à chaque nouvelle toile entamée, il ajoute 1 % de blanc dans la peinture servant au fond de sa toile, initialement noir à 100 %. Petit à petit, les fonds blanchissent, marquant d'une nouvelle manière le temps qui passe. Toutefois, afin de ne pouvoir être accusé de « fraude », Roman Opałka veille à utiliser deux blancs différents, un pour ses nombres ([blanc de titane](#)) et un pour le blanchissement progressif de son fond (blanc de zinc). Aussi, même sur ses toiles les plus récentes (donc les plus blanches), on peut encore distinguer le tracé des nombres en regardant la toile sous un certain angle⁸.

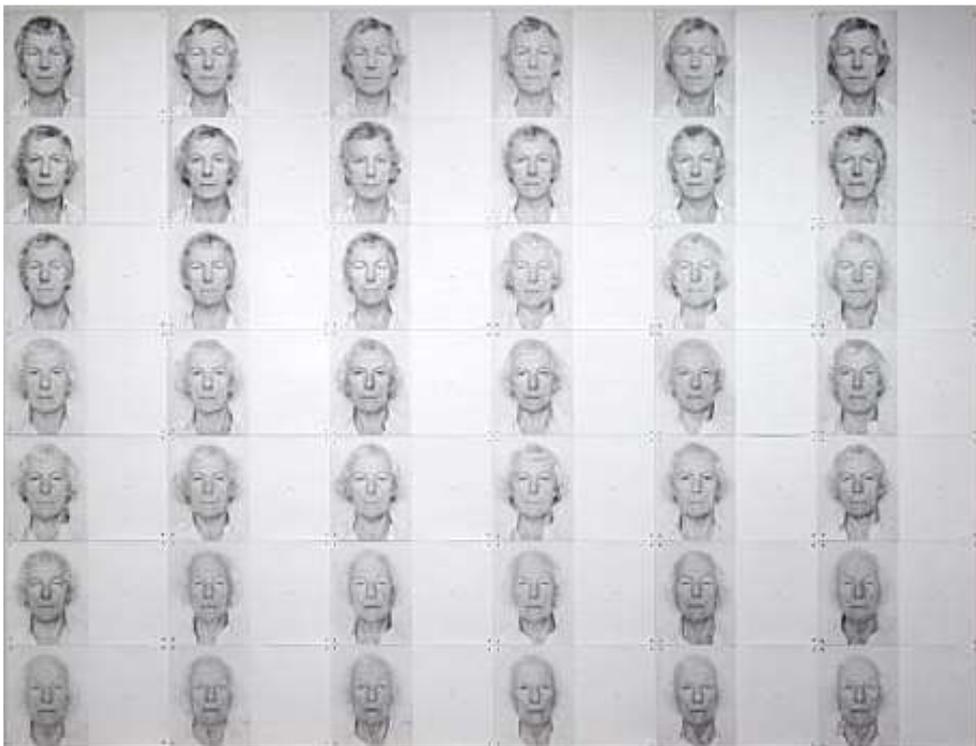
Les Autoportraits et Enregistrements sonores

Roman Opałka a entrepris deux autres démarches dans ce projet de vie artistique.

À la fin de chaque séance de travail, Opałka se prend en photo sur fond blanc selon le même protocole : cadre serré, éclairage lumineux et régulier, fond blanc, chemise blanche, cheveux qui blanchissent, il vient peu à peu se fondre dans le fond, y disparaître⁸. Ce rituel est pour lui une façon de rendre encore plus visible la dimension physique et humaine de son travail.

Lorsqu'il peint, Opałka s'enregistre sur bande magnétique, lisant, en polonais, les nombres qu'il est en train de peindre. Toujours dans ce projet de « capture » du temps, de l'instant.

https://www.youtube.com/watch?v=p5I0rDF_xpQ



À la fin de chaque séance de travail, Opałka se prend en photo sur fond blanc selon le même protocole : cadre serré, éclairage lumineux et régulier, fond blanc, chemise blanche, cheveux qui blanchissent, il vient peu à peu se fondre dans le fond, y disparaître.

La mort entropique de l'univers

Par Charles Baudelaire

1821 - 1867

Une charogne

Rappelez-vous l'objet que nous vîmes, mon âme,
Ce beau matin d'été si doux :
Au détour d'un sentier une charogne infâme
Sur un lit semé de cailloux,

Les jambes en l'air, comme une femme lubrique,
Brûlante et suant les poisons,
Ouvrait d'une façon nonchalante et cynique
Son ventre plein d'exhalaisons.

Le soleil rayonnait sur cette pourriture,
Comme afin de la cuire à point,
Et de rendre au centuple à la grande Nature
Tout ce qu'ensemble elle avait joint ;

Et le ciel regardait la carcasse superbe
Comme une fleur s'épanouir.
La puanteur était si forte, que sur l'herbe
Vous crûtes vous évanouir.

Les mouches bourdonnaient sur ce ventre putride,
D'où sortaient de noirs bataillons
De larves, qui coulaient comme un épais liquide
Le long de ces vivants haillons.

Tout cela descendait, montait comme une vague,
Ou s'élançait en pétillant ;
On eût dit que le corps, enflé d'un souffle vague,
Vivait en se multipliant.

Et ce monde rendait une étrange musique,
Comme l'eau courante et le vent,
Ou le grain qu'un vanneur d'un mouvement rythmique
Agite et tourne dans son van.

Les formes s'effaçaient et n'étaient plus qu'un rêve,
Une ébauche lente à venir,
Sur la toile oubliée, et que l'artiste achève
Seulement par le souvenir.

Derrière les rochers une chienne inquiète
Nous regardait d'un œil fâché,
Espionnant le moment de reprendre au squelette
Le morceau qu'elle avait lâché.

- Et pourtant vous serez semblable à cette ordure,
A cette horrible infection,
Etoile de mes yeux, soleil de ma nature,
Vous, mon ange et ma passion !

Oui ! telle vous serez, ô la reine des grâces,
Après les derniers sacrements,
Quand vous irez, sous l'herbe et les floraisons grasses,
Moisir parmi les ossements.

Alors, ô ma beauté ! dites à la vermine
Qui vous mangera de baisers,
Que j'ai gardé la forme et l'essence divine
De mes amours décomposés !

In Les fleurs du mal (1857)



Chrono Shredder, Susanna Hertrich



Vénus et Temps ou Chronos
G. TIEPOLO (1754-1758)
National Gallery, Londres

Chronos est la personnification du temps qui apparaît principalement dans les traditions orphiques qui le considèrent comme le fils de Gaïa et d'Hydros (Eaux primordiales).

Nonnus en revanche raconte qu'il émergea du Néant.

Il aurait comme épouse Ananké, l'allégorie de la Nécessité Impérieuse dont il aurait eu trois enfants Chaos, Aether et Phanes.

Dans la mythologie alexandrine et romaine, Chronos est le père des Heures, personnifications des douze heures du jour ou de la nuit.



Ignaz Gunther (1725-1775), bois
Chronos est représenté sur un nuage (parmi les dieux) portant une faux d'une main (représente l'agriculture puis la mort) et un sablier dans l'autre, il a le contrôle du temps. Les ailes (peu communes pour un Dieu) pour la fuite du temps ou plus généralement sa liberté



Pompeo Batoni (1708-1787),
Le Temps ordonnant à la Vieillesse de détruire la Beauté (1746)

La passion des impressionnistes pour les vibrations de la lumière



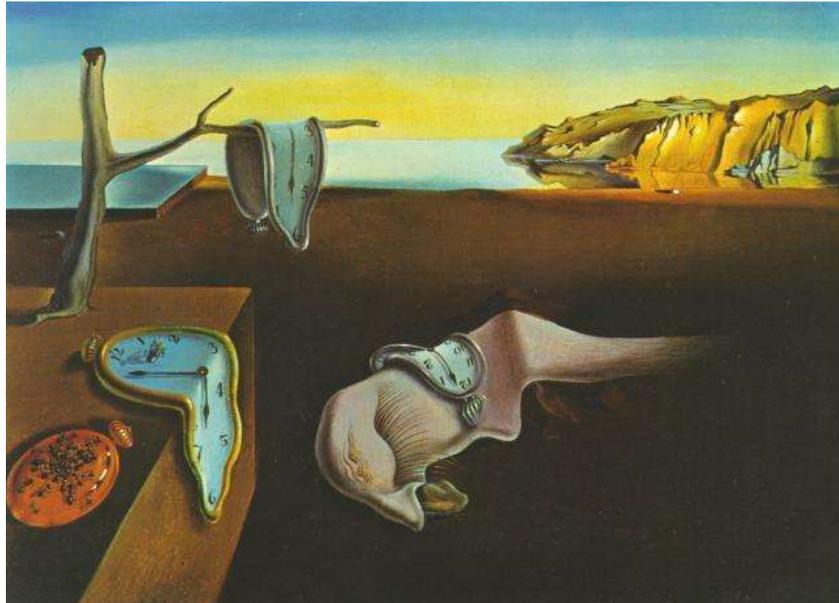
Claude Monet – Nymphéas (1914)

Les notions de lumière, d'espace et de temps se rapprochent tandis que se fait sentir l'influence des nouvelles théories scientifiques

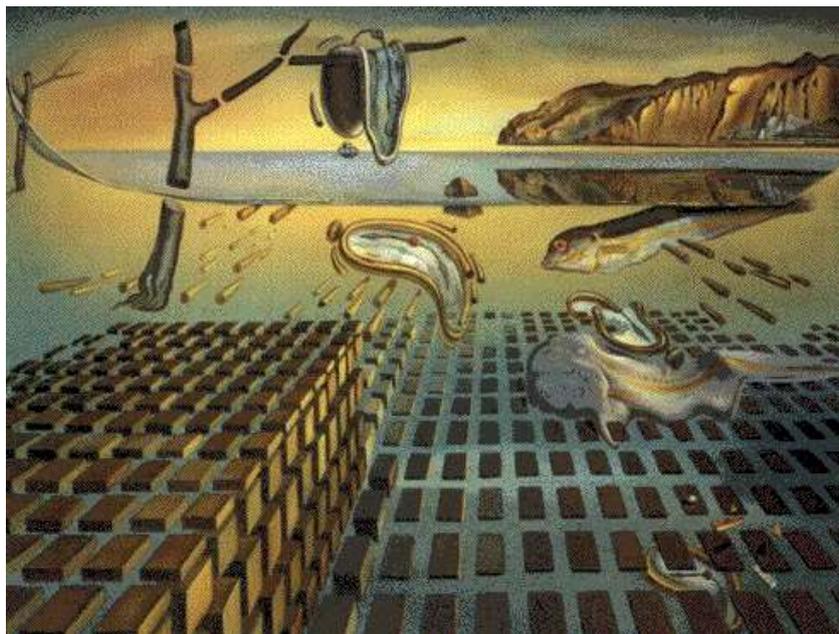


*Claude Monet
la cathédrale de Rouen : 30 tableaux 1892-1894*

et que le surréalisme permet à **Dali** d'amollir les montres

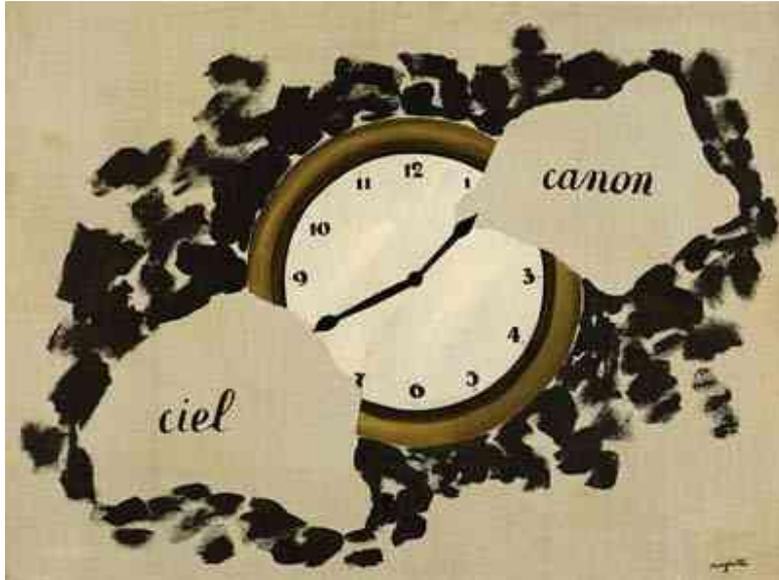


Dali, Persistance de la mémoire/Persistence of Memory, 1931

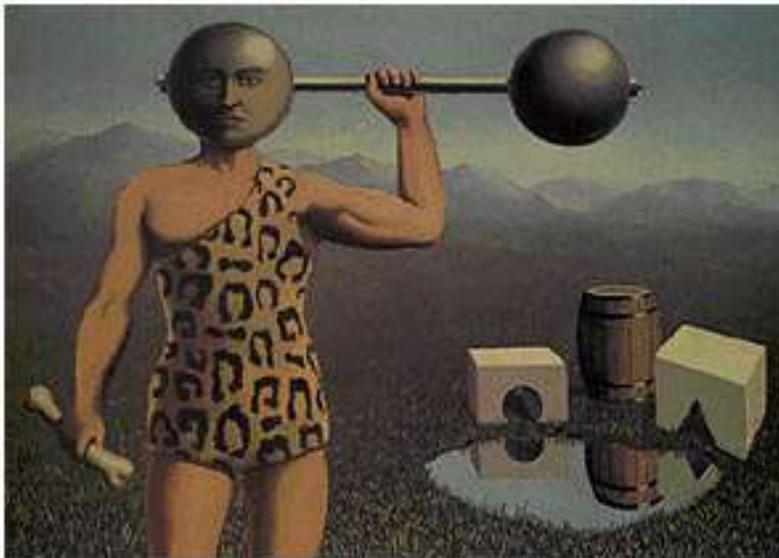


Dali, Dissolution de la Persistance de la Mémoire/The Desintegration of the Persistence of the Memory, 1952-1954

Magritte de joue avec les mots du temps



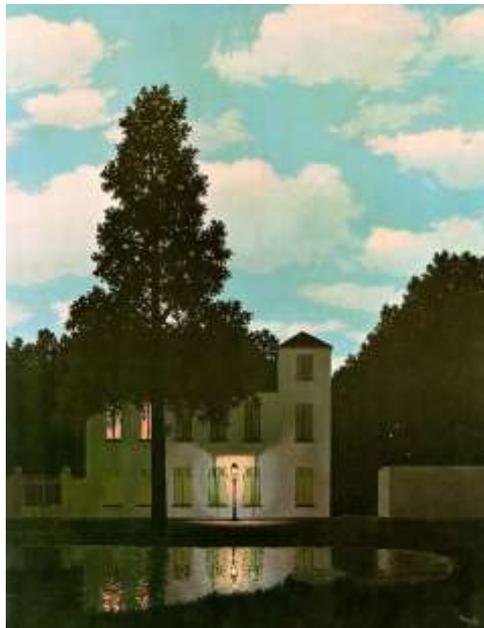
Magritte, *Reflets du Temps/Reflections of Time*, 1928



Magritte, *Mouvement perpétuel/Perpetual Motion*, 1928



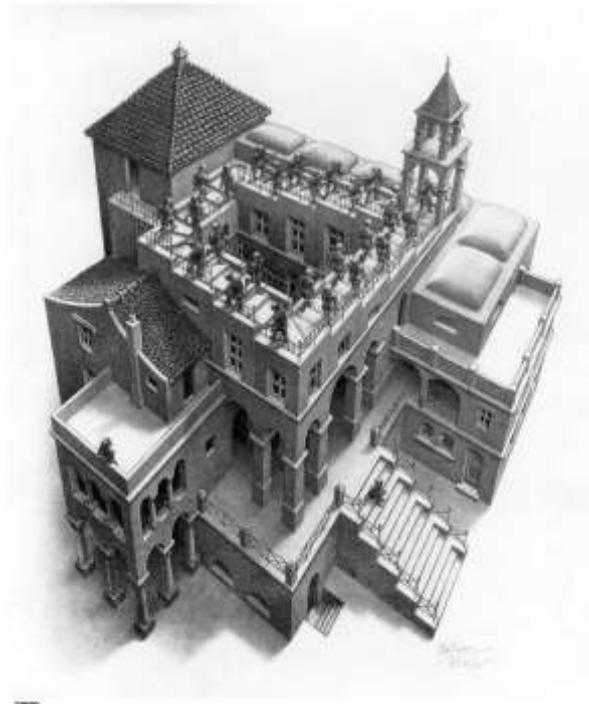
Magritte, La durée poignardée/Time Transfixed, 1938



Magritte, Empire des lumières/Empire of Lights, 1954



Magritte, La Mémoire/The Memory, 1938

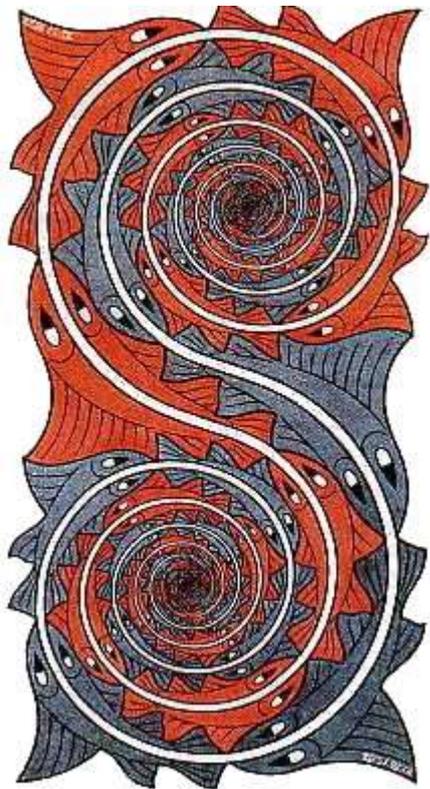


*Escher, Montée et descente/Ascending
Et depuis quand pouvons-nous imposer des
lois physiques à notre monde?*

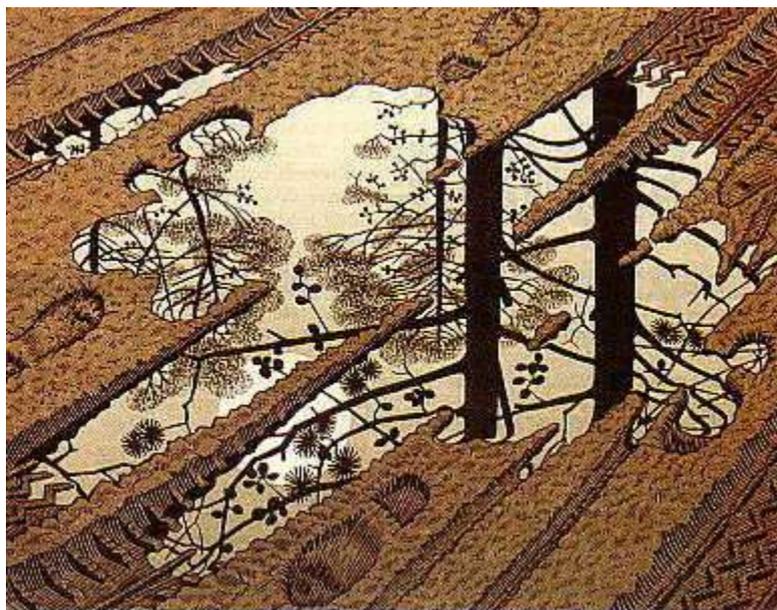


Escher, Cascade/Waterfall, 1961

*Escher aime à jouer avec les dimensions (voir Jour et
Nuit). Ici les lois de la physique sont bafouées.
Illustration du mouvement perpétuel. L'artiste
manipule notre sens de la perception tridimensionnelle,
ce qui conduit à des aberrations.*



Escher, TOURBILLONS (1957) confine l'infini dans l'espace fini d'une gravure. L'artiste dessine une projection plane de la courbe (une loxodromie) tracée sur le globe par un mobile qui coupe tous les méridiens sous un même angle. Comme les navigateurs le savent bien, suivre la loxodromie revient à décrire une spirale sans fin, s'approchant indéfiniment d'un des pôles terrestre. Escher utilisa un bloc de bois pour les deux couleurs. Il imprima d'abord le rouge, puis le tourna d'un demi-tour et imprima ainsi le gris.



Escher, FLAQUE D'EAU (1952) illustre des phénomènes de réflexion. L'image conduit notre regard vers un chemin forestier, avec des empreintes de pneus et de chaussures. Cependant dans la flaque, apparaissent des silhouettes d'arbres formant une voûte contre un ciel éclairé par la lune. Escher nous rappellent ainsi les mondes cachés au-dessous, au-

delà ou au-dessus de celui que nous croyons voir.



Illustrations du courant littéraire « steampunk »

L'art entre éphémère et éternité...



Les fauves de la grotte Chauvet (-34 000 av. J.-C.)



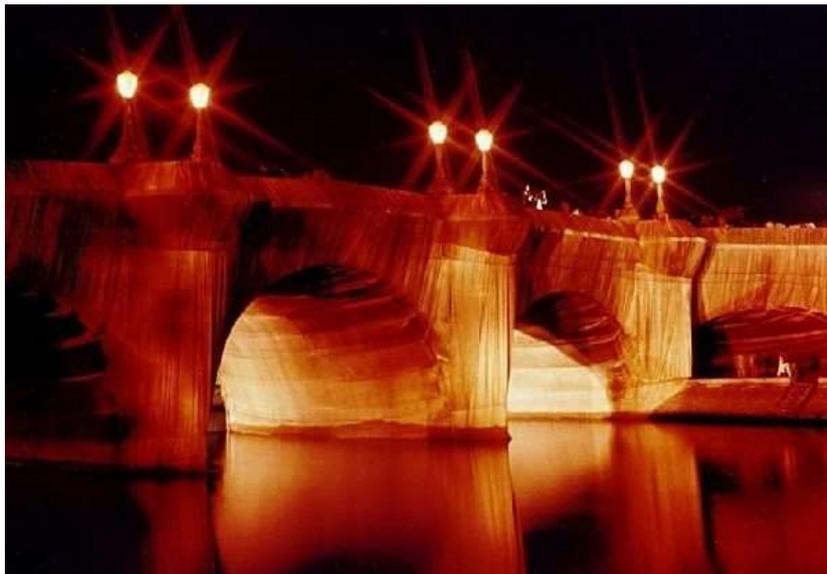
Le Sphinx de Gizeh (-2 500 av. J.-C.)

L'art entre éphémère et éternité...



Surrounded Islands, Floride, 1980-1983

Achevée en mai 1983, cette impressionnante installation a été réalisée dans la baie de Biscayne



Empaquetage du Pont neuf par Christo et Jeanne-Claude : une œuvre éphémère
(22 septembre 1985)

«J'ai voulu le transformer, faire d'un objet architectural, d'un objet d'inspiration pour les artistes, un objet d'art tout court. Qu'il devienne pour la première fois une sculpture, mais éphémère comme mon rêve».



*Empaquetage du Reichstag par Christo et Jeanne-Claude : une œuvre éphémère
(23 juin au 7 juillet 1995)*



*Empaquetage de l'Arc de Triomphe, œuvre posthume de Christo et Jeanne-Claude
(18 septembre au 3 octobre 2021)*



La Joconde (Léonard de Vinci 1503-1506)



*Empaquetage du Reichstag par Christo et Jeanne-Claude : une œuvre éphémère
(23 juin au 7 juillet 1995)*



*La Grande Pyramide du Louvre
« Pyramides : entre temps et éternité »*



*L'âge du verre
Rhyon, coupe à boire, 1^{er} siècle après J.C. Exposition sur « Le
verre dans l'empire romain », cité des sciences et de l'industrie,
Paris, 2006 © Polo Museale Fiorentino*



*Entre temps et éternité, du haut de ces arbres parfois plus
de 2000 ans nous contemplent*

LXXXV - L'Horloge

Horloge ! dieu sinistre, effrayant, impassible,
Dont le doigt nous menace et nous dit : " *Souviens-toi !*
Les vibrantes Douleurs dans ton cœur plein d'effroi
Se planteront bientôt comme dans une cible ;

Le Plaisir vaporeux fuira vers l'horizon
Ainsi qu'une sylphide au fond de la coulisse ;
Chaque instant te dévore un morceau du délice
A chaque homme accordé pour toute sa saison.

Trois mille six cents fois par heure, la Seconde
Chuchote : *Souviens-toi !* - Rapide, avec sa voix
D'insecte, Maintenant dit : Je suis Autrefois,
Et j'ai pompé ta vie avec ma trompe immonde !

Remember ! Souviens-toi, prodigue ! Esto memor !
(Mon gosier de métal parle toutes les langues.)
Les minutes, mortel folâtre, sont des gangues
Qu'il ne faut pas lâcher sans en extraire l'or !

Souviens-toi que le Temps est un joueur avide
Qui gagne sans tricher, à tout coup ! c'est la loi.
Le jour décroît ; la nuit augmente, *souviens-toi !*
Le gouffre a toujours soif ; la clepsydre se vide.

Tantôt sonnera l'heure où le divin Hasard,
Où l'auguste Vertu, ton épouse encor vierge,
Où le Repentir même (oh ! la dernière auberge !),
Où tout te dira : Meurs, vieux lâche ! il est trop tard ! "

Charles Baudelaire

XXIV – Quand vous serez bien vieille, au soir à la chandelle

Quand vous serez bien vieille, au soir à la chandelle,
Assise auprès du feu, dévidant et filant,
Direz, chantant mes vers, en vous esmerveillant,
Ronsard me célébroit du temps que j'estois belle.

Lors vous n'aurez servante oyant telle nouvelle,
Desja sous le labeur à demy sommeillant,
Qui au bruit de Ronsard ne s'aïlle resveillant,
Benissant vostre nom de louange immortelle.

Je seray sous la terre, et fantaume sans os :
Par les ombres Myrtheux je prendray mon repos.
Vous serez au fouyer une vieille accroupie,

Regrettant mon amour, et vostre fier desdain.
Vivez, si m'en croyez, n'attendez à demain :
Cueillez dés aujourd'huy les roses de la vie.

Pierre de Ronsard

Le Second Livre des Sonnets pour Hélène (1578)

Le Lac

Ainsi, toujours poussés vers de nouveaux rivages,
Dans la nuit éternelle emportés sans retour,
Ne pourrons-nous jamais sur l'océan des âges
Jeter l'ancre un seul jour ?

Ô lac ! l'année à peine a fini sa carrière,
Et près des flots chéris qu'elle devait revoir,
Regarde ! Je viens seul m'asseoir sur cette pierre
Où tu la vis s'asseoir !

Tu mugissais ainsi sous ces roches profondes ;
Ainsi tu te brisais sur leurs flancs déchirés ;
Ainsi le vent jetait l'écume de tes ondes
Sur ses pieds adorés.

Un soir, t'en souvient-il ? nous voguions en silence ;
On n'entendait au loin, sur l'onde et sous les cieux,
Que le bruit des rameurs qui frappaient en cadence
Tes flots harmonieux.

Tout à coup des accents inconnus à la terre
Du rivage charmé frappèrent les échos,
Le flot fut attentif, et la voix qui m'est chère
Laisa tomber ces mots :

« Ô temps, suspends ton vol ! et vous, heures propices,
Suspendez votre cours !
Laissez-nous savourer les rapides délices
Des plus beaux de nos jours !

« Assez de malheureux ici-bas vous implorent ;
Coulez, coulez pour eux ;
Prenez avec leurs jours les soins qui les dévorent ;
Oubliez les heureux.

« Mais je demande en vain quelques moments encore,
Le temps m'échappe et fuit ;
Je dis à cette nuit : "Sois plus lente" ; et l'aurore
Va dissiper la nuit.

« Aimons donc, aimons donc ! de l'heure fugitive,
Hâtons-nous, jouissons !

L'homme n'a point de port, le temps n'a point de rive ;
Il coule, et nous passons ! »

Temps jaloux, se peut-il que ces moments d'ivresse,
Où l'amour à longs flots nous verse le bonheur,
S'envolent loin de nous de la même vitesse
Que les jours de malheur ?

Hé quoi ! N'en pourrions-nous fixer au moins la trace ?
Quoi ! Passés pour jamais ? Quoi ! Tout entiers perdus ?
Ce temps qui les donna, ce temps qui les efface,
Ne nous les rendra plus ?

Éternité, néant, passé, sombres abîmes,
Que faites-vous des jours que vous engloutissez ?
Parlez : nous rendrez-vous ces extases sublimes
Que vous nous ravissez ?

Ô lac ! Rochers muets ! Grottes ! Forêt obscure !
Vous que le temps épargne ou qu'il peut rajeunir,
Gardez de cette nuit, gardez, belle nature,
Au moins le souvenir !

Qu'il soit dans ton repos, qu'il soit dans tes orages,
Beau lac, et dans l'aspect de tes riants coteaux,
Et dans ces noirs sapins, et dans ces rocs sauvages
Qui pendent sur tes eaux !

Qu'il soit dans le zéphyr qui frémit et qui passe,
Dans les bruits de tes bords par tes bords répétés,
Dans l'astre au front d'argent qui blanchit ta surface
De ses molles clartés !

Que le vent qui gémit, le roseau qui soupire,
Que les parfums légers de ton air embaumé,
Que tout ce qu'on entend, l'on voit et l'on respire,
Tout dise : « Ils ont aimé ! »

Alphonse de Lamartine
(1817)

Jeux avec le temps au cinéma

Looper, film de science-fiction de Rian Johnson (2012), avec Bruce Willis.

Dans un futur proche, la Mafia a mis au point un système infailible pour faire disparaître tous les témoins gênants. Elle expédie ses victimes dans le passé, à notre époque, où des tueurs d'un genre nouveau (les "Loopers") les éliminent. Un jour, l'un d'entre eux, Joe, découvre que la victime qu'il doit exécuter n'est autre que... lui-même, avec 20 ans de plus. La machine si bien huilée déraile...

L'armée des douze singes, film de science-fiction de Terry Gilliam (1996), avec Bruce Willis et Brad Pitt.

Nous sommes en l'an 2035. Les quelques milliers d'habitants qui restent sur notre planète sont contraints de vivre sous terre. La surface du globe est devenue inhabitable à la suite d'un virus ayant décimé 99% de la population. Les survivants mettent tous leurs espoirs dans un voyage à travers le temps pour découvrir les causes de la catastrophe et la prévenir. C'est James Cole, hanté depuis des années par une image incompréhensible, qui est désigné pour cette mission.

Retour vers le futur (*Back to the Future*), film de science-fiction de Robert Zemeckis, (1985).

L'intrigue relate le voyage dans le passé d'un adolescent, Marty McFly, à bord d'une machine à voyager dans le temps fabriquée par le docteur Emmett Brown à partir d'une voiture de modèle DeLorean DMC-12. Parti de l'année 1985 et propulsé en 1955, Marty, aidé du « Doc » de 1955, doit résoudre les paradoxes temporels provoqués par ses interventions dans le passé et trouver le moyen de faire fonctionner la machine pour retourner à son époque d'origine.

Le steampunk

Courant littéraire rétrofuturiste, qui crée des uchronies situant ses récits dans une diégèse qui associe l'époque de la révolution industrielle et des futurs lointains.

Steampunk et littérature :

- Les figures tutélaires du steampunk : [Mary Shelley](#), [Jules Verne](#), [Mark Twain](#) et [H. G. Wells](#) développaient les thèmes de l'artifice ou de l'automate
- [K. W. Jeter](#), [Tim Powers](#) et [James Blaylock](#)⁶. Jeter écrit *Morlock Night*^{note 1} (1979) et *Machines infernales* (1987), Powers rédige *Les Voies d'Anubis* (1983) et *Le Poids de son regard* (1989) tandis que Blaylock publie *Homunculus* (1986) et *Le Temps fugitif* (1992).
- [William Gibson](#) et [Bruce Sterling](#) (*La Machine à différences*, 1990, qui met en scène les lointains pionniers de l'informatique à l'ère victorienne)
- [Stephen Baxter](#) (*Les Vaisseaux du temps*, 1995)
- [Robert Charles Wilson](#) (*Darwinia*, 1998)
- [Daniel Riché](#) dans son anthologie, *Futurs antérieurs* (1999)
- [Francis Valéry](#) : *La Cité entre les mondes* (2000) de _

En bandes dessinées :

- *Le Démon des glaces* (1974) de [Jacques Tardi](#)
- *La Ligue des gentlemen extraordinaires* d'Alan Moore

Au cinéma :

- *Brazil* (1985) de [Terry Gilliam](#) ;
- *Le Château dans le ciel* (1986) de [Hayao Miyazaki](#) ;
- *Delicatessen* (1991) de [Marc Caro](#) et [Jean-Pierre Jeunet](#) ;
- *La Cité des enfants perdus* (1995) de [Marc Caro](#) et [Jean-Pierre Jeunet](#) ;
- *Richard III* (1995) de [Richard Loncraine](#) ;
- *Wild Wild West* (1998) de [Barry Sonnenfeld](#) ;
- *La Planète au trésor, un nouvel univers* (*Treasure Planet*) (2002), film d'animation inspiré par le livre *L'Île au trésor* ;
- *Metropolis* (2001) de [Rintarō](#) ;
- *La Ligue des gentlemen extraordinaires* (2003) de [Stephen Norrington](#) ;
- *Les Désastreuses Aventures des orphelins Baudelaire* (2004) de [Brad Silberling](#) ;
- *Steamboy* (2004) de [Katsuhiro Ōtomo](#) ;
- *Les Trois Mousquetaires* (2011) de [Paul W. S. Anderson](#) ;
- *Hugo Cabret* (2011) de [Martin Scorsese](#).
- *Le vent se lève* (2013) de [Hayao Miyazaki](#). (Les avions et engins à vapeur)

- [Jack et la Mécanique du cœur](#) (2013) de Stéphane Berla
- [Avril et le Monde Truqué](#) (2015) de [Franck Ekinici](#) et [Christian Desmares](#)

Séries télévisées

- [Les Mystères de l'Ouest](#) (*The Wild Wild West*, 1965-1969), série télévisée proto-steampunk dès 1965 qui mixe western et espionnage et mettant en scène deux agents du United States Secret Service, James T. West et Artemus Gordon, utilisant des gadgets à la James Bond, opposés à des criminels aux projets et aux inventions machiavéliques dans l'Amérique des années 1870
- [L'Île mystérieuse \(mini-série\)](#) (1973) ;
- [Doctor Who](#) ;
- [Les Enquêtes de Murdoch](#) (*The Murdoch Mysteries*) ;
- [Le Visiteur du futur](#) : la quatrième saison, dite « néo-Versailles », est directement inspiré du style steampunk².
- [Code Geass](#) (2006-2007)
- [Wakfu](#) : les machines de Nox le méchant et les engins aux derniers épisodes de la saison 2.
- [One Piece](#) : les machines et navires à vapeur.
- [La famille pirate](#) : les engins anachroniques sont du style steampunk.

Quelques références non exhaustives

En caractères bleus vous trouverez des ouvrages des réflexions philosophiques sur la science, dont les auteurs ont apporté des contributions immenses aux savoirs.

- Alain Aspect, *Einstein et les révolutions quantiques*, CNRS Editions, 2019
- Bardon Adrian, *A Brief History of the Philosophy of Time*, 2013
- Barrau Aurélien, *Des univers multiples, A l'aube d'une nouvelle cosmologie*, Coll. Quai des Sciences, Dunod, 2014
- Baudson Michel, œuvre collective sous la direction de, *L'art et le temps*, Albin Michel, 1985
- Bergson Henri (Prix Nobel de Littérature 1927), *L'évolution créatrice*
- Birnbaum Jean sous la direction de, *Où est passé le temps ? Foliot essais*, Éditions Gallimard, 2012
- Bohr Niels (Prix Nobel de Physique 1922), *Physique atomique et connaissance humaine*, Ed. Gauthier-Villars, coll. Discours de la méthode, Paris, 1972 (édition originale : 1933 à 1958)
- Born Max (Prix Nobel de Physique 1954), *La responsabilité du savant*, Ed. Payot, coll. Bibliothèque scientifique, Paris, 1967
- Broglie Louis de (Prix Nobel de Physique 1929), *Certitudes et incertitudes de la science*, Ed. Albin Michel, Coll. Sciences d'aujourd'hui, Paris, 1966
- Callender Craig sous la direction de, *The Oxford Handbook of Philosophy of Time*, 2011
- Changeux Jean-Pierre, *L'homme neuronal*, Fayard 1983
- Connes Alain (mathématicien et physicien, Médaille Fields 1982) & Changeux Jean-Pierre, *Matière à pensée*, Editions Odile Jacob, 1989
- Connes Alain, Danye Chéreau & Jacques Dixmier, *Le théâtre quantique, l'horloge des anges ici-bas*, roman, Editions Odile Jacob, 2013
- Connes Alain, Danye Chéreau & Jacques Dixmier, *Le spectre d'Atacama, trio pour la fin du temps*, roman, Editions Odile Jacob, 2018
- Correspondance Einstein – Bergson
- Damour Thibault & Carrière Jean-Claude, *Entretiens sur la multitude du monde*, Editions Odile Jacob, 2002
- Damour Thibault *Si Einstein m'était conté, De la relativité à la théorie des cordes*, Editions du Cherche-Midi, 1^{ère} éd. 2005, 2^{ème} éd. 2012
- Darwin Charles, *L'évolution des espèces*, 1^{ère} édition, nov. 1858, tirée à 1250 exemplaires

- Einstein Albert (Prix Nobel de Physique 1921), *Conceptions scientifiques, morales et sociales*, Ed. Flammarion, Coll. Champs Sciences, Paris, 1952 (édition originale : 1934)
- Einstein Albert, *La relativité*, Ed. Payot, Paris 1972
- Einstein Albert & Infeld Léopold, *L'évolution des idées en physique, des premiers concepts aux théories de la relativité et des quanta*, Ed. Flammarion, Coll. Champs Sciences, Paris, 1975 (édition originale : 1938)
- Feynman Richard, *Lumière et matière, une étrange histoire*, Ed. Points, Coll Sciences, Paris 1987 (édition originale : 1983)
- Galileo Galilei, *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, ed. le Seuil, coll. Sources du Savoir, 1992
- Hawking Stephen, *Commencement du temps et fin de la physique ?* Flammarion, Coll. Champs Sciences 1992, titres originaux : *Is the end of Sight for Theoretical Physics?* 1980, *The Edge of Space Time*, 1989, Co Camgidge University Press
- Hawking Stephen, *Une brève histoire du temps, du big bang aux trois noirs*, Flammarion, Nouvelle bibliothèque scientifique 1989, édition originale : *A brief history of time*, Batam Book, New York, 1988
- Hawking Stephen, *Une belle histoire du temps* Flammarion, Coll. Champs Sciences 2009,
- Hawking Stephen & Mlodinow Léonard, *Y a-t-il un grand architecte dans l'Univers ?*, Ed. Odile Jacob, Coll ; poches Sciences, 2014
- Heisenberg Werner (prix Nobel de Physique 1932), *La partie et le tout*, Ed. Flammarion, Coll. Champs Sciences, 2016 (édition originale : 1069)
- Heisenberg Werner, *Physique et philosophie*, Ed. Albin Michel, Coll. Sciences d'aujourd'hui, 1962
- Jacob François (Prix Nobel de Physiologie ou Médecine 1965), *La logique du vivant*, Gallimard, 1976
- Jacob François, *Le jeu des possibles*, Garnier Flammarion, 1986
- Jacob François, *La statue intérieure*, Ed. Odile Jacob, Coll. Folio, Paris, 1987
- Jacquard Albert, *Éloge de la différence*, Seuil 1981
- Jankélévitch Vladimir, *L'irréversible et la nostalgie*, Coll. Champs Flammarion, 1974
- Jordan Pascual, *La Physique et le secret de la vie organique*, Ed. Albin Michel, Paris, 1959
- Klein Etienne et Spiro Michel, ouvrage collectif sous la direction de, *Le temps et sa flèche*, Editions Frontières, 1^{ère} éd. 1994, 2^{ème} éd. 1995
- Le Ru Véronique, *Le temps, la plus commune des fictions*, PUF, Philosophies, octobre 2012

- Lecuit Thomas, Paris, Collège de France / Fayard, coll. « Leçons inaugurales », pour la Chaire « *Dynamiques du vivant* » n° 272, 2018, 96 p., ISBN : 978-2-213-70937
- Maudlin Tim, *Philosophy of Physics: Space and Time*, Princeton Foundations of Contemporary Philosophy, 2012
- Monod Jacques (Prix Nobel de Physiologie ou Médecine 1965), *Le hasard et la nécessité*, Le Seuil, 1973
- Ormesson Jean d', *C'est une chose étrange à la fin que le monde*, Robert Laffont, 2010
- Penrose Roger (mathématicien et physicien, Prix Nobel de physique 2020), *Les Cycles du temps, Une nouvelle vision de l'Univers*, Ed. Odile Jacob, coll. Sciences, Paris 2013
- Penrose Roger, *La nouvelle vision de l'Univers, Mode, croyance, imaginaire*, Ed. Odile Jacob, coll. Sciences, Paris 2018
- Poincaré Henri, *La valeur de la science*, Ed. Flammarion, Coll. Champs sciences, 1970 (édition originale : 1905)
- Poincaré Henri, *La science et l'hypothèse*, Ed. Flammarion, Coll. Sciences de la nature, 1968 (édition originale : 1917)
- Prigogine Ilya (Prix Nobel de Chimie 1977) & Stengers Isabelle, *La nouvelle alliance*, Gallimard 1979 (de nombreuses fois réédité, et à qui le texte ci-dessus doit beaucoup)
- Prigogine Ilya & Stengers Isabelle, *Entre le temps et l'éternité*, Gallimard 1988
- Prigogine Ilya, œuvre collective sous la direction de, *L'homme devant l'incertain*, Editions Odile Jacob, 2001
- Rovelli Carlo, *Et si le temps n'existait pas ? Un peu de science subversive*, Ed. Dunod 2012, coll. Quai des sciences
- Rovelli Carlo, *Par-delà le visible, La réalité du monde physique et la gravité quantique* Ed. Odile Jacob, coll. Sciences, 2014
- Rovelli Carlo, *L'ordre du temps*, Ed. Flammarion 2018
- Rovelli Carlo, *Helgoland, Le sens de la mécanique quantique*, Ed. Flammarion 2021
- Russell Bertrand (mathématicien et philosophe, Prix Noble de Littérature 1950), *L'analyse de la matière*, Ed. Payot, coll. Bibliothèque scientifique, Paris, 1965
- Russell Bertrand, *L'esprit scientifique, et la science dans le monde moderne* Ed. J.B. Janin, coll. Paris, 1947
- Russell Bertrand, *Science et religion* Ed. Gallimard, coll. Idées, 1971 (édition originale : 1935)
- Saint Augustin, *Les Confessions*, Livre 11, chapitres 14 & 20
- Schrödinger Erwin (Prix Nobel de Physique 1933), *L'esprit de la matière*, Ed. Seuil, Coll. Sources du savoir, Paris, 1990 (édition originale : 1958)

- Smolin Lee, *Rien ne va plus en physique ! L'échec de la théorie des cordes*, Dunod 2007, coll. Quai des sciences, édition originale : *the Trouble with Physic – The Rise of String Theory, the Fall of a Science, and What Comes Next*. éd. Houghton Mifflin, 2006
- Smolin Lee, *La renaissance du temps, pour en finir avec la crise de la physique*, Dunod 2014, coll. Quai des sciences, édition originale : *Time Reborn*, éd. Houghton Mifflin Hartcourt, 2013
- Smolin Lee, *La révolution inachevée d'Einstein*, Dunod 2019, coll. Quai des sciences, édition originale : *Einstein's Unfinished Revolution: the search for what lies beyond the quantum*, Ed. Spin Networks, 2019
- Snow Charles P., *Les deux cultures*, Ed. Jean-Jacques Pauvert, Coll. *Libertés nouvelles*, 1968.
- Weinberg Steven (Prix Nobel de Physique 1979), *Les trois premières minutes de l'univers*, éditions du Seuil, 1977

Dans les revues

- « Les paradoxes du temps », Pour la Science, numéro Collector, Hors-série, novembre 2018-janvier 2019.
- « Le temps, A-t-il un début ? A-t-il une fin ? Voyage aux frontières de la physique », La Recherche – Hors-série, n°20 – décembre 2016-janvier 2017
- Saint Augustine *et le temps*, Etienne Klein et Jean-Luc Marion, Philosophie Magazine n° 85, décembre 2014-janvier 2015
- « La réalité n'existe pas », n° spécial 489 de La Recherche, juillet-août 2014
- « Le temps est-il une illusion », n° spécial de Pour la Science, novembre 2010
- Le temps n'existe pas, La Recherche, juin 2010
- De la naissance à la mort, pourquoi le temps passe de plus en plus vite, in Science & Vie, février 2010
- Hasard et incertitude, numéro spécial, Pour la Science, novembre 2009
- Nager dans l'espace-temps, un mode de locomotion prévu par la relativité générale, Pour la Science, octobre 2009
- « Temps à devenir » par Ilya Prigogine, in « l'Univers est-il sans histoire », Hors-Série Science & Avenir avril 2006
- L'énigme de l'émergence, Hors-Série Science & Avenir, juillet-août 2005
- Le temps avant le Big Bang, Pour la Science, juin 2004
- Ordre et désordre, La Recherche, Hors-Série novembre-décembre 2002
- Le chaos, Dossier de Pour la Science, décembre 2003
- Le temps, Hors-Série La Recherche, avril 2001
- Le hasard, Dossier de Pour la Science, avril 1996
- La complexité, n° spécial de Pour la Science, janvier 1995
- La science du désordre, n° spécial de La Recherche, mai 1991
- Temps et énergie : un couple incertain : La Recherche – novembre 1989 « le pouvoir créateur des mathématiques »
- « L'irréversibilité du temps ». La recherche février 1989.

Et aussi :

- « Enquête sur une symétrie au-dessus de tout soupçon » La Recherche mars 1989.
- « Le pouvoir créateur des mathématiques » La Recherche novembre 1989
- « Un piège pour les atomes ultra-froids » La Recherche février 1981. (ou 1991)
- « L'univers est-t-il fait de cordes » La Recherche janvier 1986.
- « La gravitation quantique » La Recherche novembre 1984.
- « Les trous noirs géants » La Recherche juin 1980.

Sur le Web

- Qu'est-ce que le temps ? par Marc Lachièze Rey
https://www.youtube.com/watch?v=H9K_cCFOEPg
- conférence : Peut-on voyager dans le temps ? par Marc Lachièze Rey
<http://tinyurl.com/voyage-temps-lrey> :
- conférence : Peut-on voyager dans le temps ? par Etienne Klein
<http://tinyurl.com/voyage-temps-klein>
- Pourquoi la flèche du temps - Ep.15 - e-penser : <http://tinyurl.com/benamran-fleche-temps>
- Voyage dans le temps - e-penser : <http://tinyurl.com/benamran-voyage-temps>
- Boson de Higgs et structure fine de l'espace-temps, par Alain Connes :
<http://tinyurl.com/espace-temps-connes>
- Faut-il tuer le temps ? – 1^{ère} partie : les exposés :
<https://www.youtube.com/watch?v=a7qOxooJn98>
- Faut-il tuer le temps ? – 2^{ème} partie : le débat :
<https://www.youtube.com/watch?v=AJpQPQYMQAU>
- Conférence Carlo Rovelli « temps, espace, matière...ne sont plus ce qu'ils étaient! » <https://www.youtube.com/watch?v=YIRT8Z2cXIY>