



HAL
open science

L'Action à distance - Des Principia à la seconde révolution quantique

Éric Picholle

► **To cite this version:**

Éric Picholle. L'Action à distance - Des Principia à la seconde révolution quantique. Nicolas Weil-Parrot & Béatrice Delaurenti. L'Action à distance au Moyen-Âge et au-delà, Jérôme Millon, pp.121-155, 2024, 2-84137-431-1. hal-03872380v2

HAL Id: hal-03872380

<https://hal.science/hal-03872380v2>

Submitted on 23 Nov 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

L'Action à distance au Moyen-âge et au-delà

dir. Nicolas Weill-Parot & Béatrice Delaurenti — Jérôme Million éd., 2024, pp. 121-155

Des *Principia* à la seconde révolution quantique

Éric Picholle

Le problème était : mais qu'est-ce qui fait tourner les planètes ? [Au Moyen-Âge], l'une des théories envisagées était que des anges invisibles les poussaient en avant en battant des ailes. Vous verrez que cette théorie a été modifiée. On sait désormais que les anges ne doivent pas voler dans la direction qu'on pensait et qu'ils n'ont pas d'ailes. À part ça, c'est une théorie assez similaire !

Richard Feynman (1962)¹

Enfin, après cinq chapitres d'histoire médiévale, Newton vient.² L'histoire du concept d'action à distance, désormais pleinement compris et maîtrisé, pourrait presque s'arrêter là — du moins aimerait-on le croire... Un rapide rappel de quelques éléments de mécanique classique de lycée, peut-être de quelques ajustements einsteiniens, mais qui ne feraient que renforcer la robustesse des conceptions newtoniennes, ultra-majoritaires dans notre imaginaire scientifique collectif, et on pourrait conclure.

Mais Béatrice Delaurenti et Nicolas Weill-Parot ont eu l'imprudence de demander à un physicien, quanticien par surcroît, de retracer l'histoire des débats sur l'action à distance, depuis Newton jusqu'à nos jours. L'objet de ce dernier article est donc de montrer d'une part que, loin de clore les débats dans la communauté physicienne, la vision newtonienne a été très discutée, en particulier au XIX^e siècle ; et d'autre part comment les deux grandes révolutions de la physique au XX^e siècle, les théories einsteiniennes de la relativité et la mécanique

-
1. Richard Feynman, Ralph Leighton & Matthew Sands, « The Theory of Gravitation », in *The Feynman Lectures in Physics*, vol. 1, §7, Addison Wesley éd., 1964. En toute rigueur, dans la philosophie médiévale, les anges n'ont pas d'ailes, mais sont définis comme des substances spirituelles séparées. Mais Feynman s'amuse à imaginer des anges newtoniens cachés *derrière* les planètes et les poussant *vers* le soleil, quand leurs homologues aristotéliens voleraient dans la même direction qu'elles pour les pousser *dans le sens du mouvement*. Accessible en ligne : https://www.feynmanlectures.caltech.edu/I_07.html (mars 2023).
 2. « *Enfin Newton vient, le grand Newton, qui découvre la loi de l'attraction universelle et en déduit la démonstration mathématique des lois de Kepler.* » Discours de réception de Marcellin Berthelot à l'Académie Française, 2 mai 1901.

quantique, nous ont forcés à revoir en profondeur notre compréhension de l'action à distance, au prix parfois de bricolages conceptuels assez vertigineux, et peut-être soulevé plus de questions encore qu'elles n'en ont résolu...

1. L'action à distance après Newton

1.1 *Les Principia*

Ouvrage paradigmatique par excellence, les *Principes mathématiques de philosophie naturelle* d'Isaac Newton³ (1687) n'en constituent pas moins un livre profondément ambigu. Un demi-siècle après que les *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*⁴ (Galilée, 1632) et le *Discours de la méthode*⁵ (Descartes, 1637) avaient ouvert la voie à une science en langage vernaculaire, donc à une nouvelle génération de savants et même déjà d'ingénieurs laïcs, ils sont écrits en latin. La première traduction anglaise, due à Andrew Motte, n'est publiée qu'en 1729, et la traduction française d'Émilie du Chatelet en 1756. D'autre part, Newton retranscrit délibérément ses démonstrations mathématiques, pour lesquelles il avait inventé le calcul différentiel, dans le langage de la géométrie analytique, sous une forme souvent difficile, voire parfois absconse.

Il en va de même des interprétations sous-jacentes, et tout particulièrement en ce qui concerne l'action à distance. Alors même que les *Principia* suivent une approche ostensiblement axiomatique et s'ouvrent sur une série de huit définitions, dont trois concernent différents types de forces (celle « qui réside dans la matière », *vis insita* [i.e. l'inertie] ; la « force imprimée », *vis impressa* ; et la « force centripète », *vis centripeta*^{3a}), l'attraction gravitationnelle, qui fait aujourd'hui la gloire de Newton, n'est jamais explicitement élucidée, ni même nommée, sauf pour se défendre d'employer le terme⁶. La onzième section, « Du mouvement des corps qui s'attirent mutuellement par des forces centripètes », s'ouvre même sur un *caveat* :

Je vais expliquer les mouvements produits par ces forces que je nomme *attractions*, quoique peut-être je devrais plutôt les appeler *impulsions* [*Impulsus*], pour parler le langage des Physiciens ; mais

3. I. Newton, *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* (*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, 1687) ; Paris : Dunod, 2005, trad. É. du Chatelet. (a) pp. 3-4 ; (b) p. 122 ; (c) pp. 4-5.

4. Galilée, *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* (*Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, 1632) ; Paris : Seuil, coll. Points Sciences, 2000.

5. René Descartes, *Discours de la méthode* (1637) ; Paris : Garnier-Flammarion, 2016.

6. John Henry, « Newton and Action at a Distance », in *The Oxford Handbook of Newton*, dir. E. Schliesser & C. Smeenk, 2014. Accessible en ligne :

https://www.academia.edu/38523611/Newton_and_Action_at_a_Distance_between_Bodies_2014 (mars 2023)

je laisse à part les disputes qu'on peut élever sur cette dénomination, et je me sers des expressions les plus commodes pour les Mathématiciens.^{3b}

Disputes il pourrait y avoir, en effet : avant même d'avoir lu l'ouvrage, tout juste publié, Christiaan Huyghens écrivait : « *Je souhaite de voir le livre de Newton. Je veux bien qu'il ne soit pas Cartésien pourvu qu'il ne nous fasse pas des suppositions comme celle de l'attraction.* »⁷ Pour lui comme pour la plupart des pré-newtoniens, l'enjeu est clairement celui d'une attraction à *distance*, non médiatisée par un équivalent ou un autre des *tourbillons* de Descartes, *a fortiori* sur des distances astronomiques. Newton, lui, s'en est pourtant déjà affranchi. Dès le commentaire de son introduction de la « force centripète » (Déf. V), il n'hésite pas à en donner pour exemples « *la force, quelle qu'elle soit, qui retire à tout moment les planètes du mouvement rectiligne* » ou la force de gravité de la Lune (« *supposé qu'elle gravite* »...) ^{3c}.

1.2 Hypotheses non fingo

Pourquoi alors ces pudeurs ? On cite souvent le « *hypotheses non fingo* » par lequel Newton les revendique hautement dans la Scholie générale de la seconde édition des *Principia* (1713) :

Je n'ai pu encore parvenir à déduire des phénomènes la raison de ces propriétés de la gravité, et je n'imagine point d'hypothèses. Car tout ce qui ne se déduit point des phénomènes est une hypothèse ; et les hypothèses, soit métaphysiques, soit physiques, soit mécaniques, soit celles des qualités occultes, ne doivent pas être reçues dans la philosophie expérimentale.^{8a}

Un tel argument, d'ordre épistémologique, serait sans doute plus convaincant si Newton lui-même ne se laissait aller sans complexe, dans son *Optique*⁹ ou *a fortiori* dans l'inachevé *De l'air et de l'éther*¹⁰, à « *bricoler des hypothèses* »¹¹ sur l'action à distance⁷. Et, surtout, si ce paragraphe ne venait conclure un long développement sur l'existence d'un plan divin immanent dont, en un sens, la gravitation universelle pourrait être l'expression physique :

Cet admirable arrangement du Soleil, des planètes et des comètes, ne peut être que l'ouvrage d'un être tout puissant et intelligent.^{8b} (...)

7. Lettre de Christiaan Huyghens à Fatio de Duillier du 11 juillet 1687, cité par François de Gandt, « Les *Principia* et le mécanisme », introduction à *De la gravitation, suivi de Du mouvement des corps*, Gallimard, coll. Tel, 1995, p.11.

8. *Principia* (a) pp. 412-413 ; (b) p. 410 ; (c) p. 411 ; (d) p. 412 (c'est $\epsilon\pi$ qui surligne).

9. I. Newton, *Optique* (*Opticks*, 1704) ; Paris : Dunod, 2015.

10. I. Newton, *De Aere et Aethere*, in *Unpublished Scientific Papers of Isaac Newton*, dir. A. R. Hall et M.B. Hall Cambridge : Cambridge University Press., 1962, pp. 214-228.

11. Je préfère cette traduction, discutable mais plus vigoureuse, au très neutre « faire des hypothèses » de la Marquise du Chatelet.

[Le vrai Dieu] est présent partout dans l'espace infini : il régit tout ; et il connaît tout ce qui est et ce qui peut être. (...) Il est existant partout et en tout lieu, il constitue l'espace et la durée.^{8c} (...) D'où il finit qu'il [Le Dieu suprême] est tout semblable à lui-même, tout œil, tout oreille, tout cerveau, tout bras, tout sensation, tout intelligence et tout action ; d'une façon nullement humaine, encore moins corporelle, et entièrement inconnue.^{8d}

Paradoxalement, ce ne sont pas les objections scientifiques, cartésiennes ou non, à la notion d'action à distance qu'Isaac Newton se refuse ici à affronter ; c'est plutôt ce qu'il appelle la *gravité épicurienne*,¹² la notion d'une action à distance qui serait une propriété intrinsèque de la matière, exclusivement physique, sans qu'aucune sorte d'intervention divine soit nécessaire. C'est ce que Newton théologien se refuse à cautionner en aucune façon, comme il l'analysait dans *De la gravitation* :

On a beau regarder autour de soi, on ne trouve guère d'autre cause à l'Athéisme que cette notion de corps dotés d'une réalité en soi, complète, absolue et indépendante, notion telle que beaucoup d'entre nous la concevons dans notre esprit d'ordinaire par négligence depuis l'enfance, si je ne me trompe ; alors que nous la disons, dans nos paroles, créée et dépendante. (...) Car, assurément, tout ce qui ne peut exister indépendamment de Dieu ne peut pas être véritablement compris indépendamment de l'Idée de Dieu.¹³

Les Newtoniens du XVIII^e siècle sont souvent plus explicites, comme Voltaire, pour lequel la matière « *a reçu de Dieu la gravitation* »^{14a}, ou Émilie du Chatelet, qui avoue encore « *quelque répugnance à admettre [la gravitation] comme cause des phénomènes, et à en faire une propriété de la matière* »^{14b}.

Tous deux fins lecteurs de Newton, Napoléon Bonaparte et Pierre-Simon de Laplace s'en amusent dans un échange devenu lui aussi mythique. Recevant les derniers tomes du *Traité de mécanique céleste*¹⁵ qui, plus d'un siècle après, peut enfin prétendre aller plus loin¹⁶ que les *Principia*, y compris en modernisant considérablement le formalisme¹⁷, l'Empereur ironise :

12. I. Newton, Lettre à Richard Bentley, in *Papers and Letters in Natural Philosophy*, dir. I. Bernard Cohen, Cambridge, U.S.A. : Harvard University Press., pp. 302-303.

Eric Schliesser, « On Reading Newton as an Epicurean : Kant, Spinozism and the Changes to the *Principia* » *Studies in the History and Philosophy of Science*, **44**: 2013, pp. 416-428.

13. I. Newton, *De la gravitation et de l'équilibre des fluides et des solides dans les fluides (De Gravitatione, ca. 1665)* ; in *De la gravitation*, op. cit., p. 137.

14. (a) Voltaire, lettre à Frédéric II du 8 mars 1738 ; (b) É. du Chatelet, lettre à Maupertuis du 26 juin 1741 ; cités par Gerhardt Stenger, « Quand Voltaire expliquait l'attraction newtonienne aux français », *Revue Voltaire*, **13**, Presses Un. Paris Sorbonne, 2013.

15. Pierre-Simon de Laplace, *Traité de mécanique céleste (1799-1805)* ; Paris : Jacques Gabay, 2006.

16. ... Et jusqu'à spéculer sur la possibilité d'étoiles si massives que la lumière ne pourrait s'en échapper, si elle était sensible à la gravitation — ce que l'on appellerait aujourd'hui un « trou noir ». Pierre-Simon de Laplace, « Beweis des Satzes, dass die anziehende Kraft bey einem Weltkörper so gross seyn könne, dass das Licht davon nicht ausströmen kann », *Allgemeine Geographische Ephemeriden*, **4**, pp. 1-6, 1799. cf. Colin Montgomery, Wayne Orchiston et Ian Whittingham, « Michell, Laplace and the origin of the black hole concept », *Journal of Astronomical History and Heritage*, **12**, 2, pp. 90-96, 2009.

17. Laplace introduit par exemple explicitement la notion de *vecteur*, qui en simplifie considérablement l'accès.

- Comment, vous faites tout le système du monde, vous donnez les lois de toute la création et, dans tout votre livre, vous ne parlez pas une seule fois de l'existence de Dieu !
 — Sire, je n'avais pas besoin de cette hypothèse.¹⁸

Désormais, pour les physiciens, ce ne sera plus Dieu qui « connaît tout ce qui est et qui peut être », mais un impossible petit personnage imaginaire, le « démon de Laplace ».

1.3 Et le temps dans tout ça ?

La décroissance de la force de gravitation entre deux objets (de masses respectives m_1 et m_2) en raison inverse du carré de la distance d qui les sépare — et donc la portée infinie de cette interaction à distance — est explicite dans les *Principia*. Ce n'est toutefois qu'à la toute fin du XIX^e siècle qu'elle trouvera sa forme aujourd'hui classique¹⁹ :

$$F = \frac{G m_1 m_2}{d^2}$$

où G est une constante empirique, évaluée pour la première fois par Henry Cavendish en 1798.

Ce qui, dans cette expression, saute aux yeux d'un physicien actuel, c'est d'abord ce qui ne s'y trouve *pas* : si la distance y intervient explicitement, ce n'est pas le cas du temps. En d'autres termes, la gravitation newtonienne est, implicitement, une action à distance *instantanée* — ce qui n'était pas le cas des tourbillons cartésiens, dont l'action se propageait de proche en proche.

Or le temps est au cœur du projet des *Principia*. Plus précisément, dès le premier *item* de la première Scholie, Newton distingue un « temps absolu, vrai et mathématique, sans relation à rien d'extérieur » d'un « temps relatif, apparent et vulgaire »^{20a}. En plus d'être la source de « plusieurs erreurs », confondre les deux serait « faire offense au Texte Sacré »^{20b}.

Il introduit de même une distinction fondamentale entre, d'une part, les « forces centripètes » (comme la gravité) et d'autre part « celles qui résident dans la matière », qui « ne diffère[nt] de ce qu'on appelle l'inertie de la matière que par la manière de la concevoir »^{20c}.

18. Cité par Victor Hugo, citant lui-même François Arago, in *Choses vues* (1847-1848), Paris : Flammarion, coll. Folio, 1972.

19. Cette formule exprime en fait l'intensité de la force gravitationnelle, dont l'unité est le "newton" [N] (et non le kilogramme [kg], qui est une unité de masse). Par souci de simplicité, les quelques équations intervenant dans cette section sont données sous cette forme scalaire. On peut y intégrer l'information sur la direction dans laquelle s'applique cette force en lui donnant une forme vectorielle : $\vec{F}_{12} = -G \frac{m_1 m_2}{d^2} \vec{u}_{12}$, où \vec{u}_{12} est le vecteur unitaire orienté de l'objet 1 vers l'objet 2.

20. *Principia* (a) p. 7 ; (b) p. 11 ; (c) pp. 3-4 ; (d) p. 5.

Ces forces d'inertie, que l'on qualifie souvent de « fictives » ou « apparentes », relèvent par nature du temps relatif, « apparent et vulgaire » ; à l'opposé, les forces de gravitation, en quelque sorte ontologisées, ne sauraient relever que du temps absolu et leur quantité « *peut être considérée comme absolue, accélératrice et motrice* »^{20d}.

On pourrait conjecturer que, plutôt que d'un élitisme forcené, la véritable raison du choix de Newton de donner toutes les démonstrations des *Principia* dans le langage de la géométrie procède de la même distinction : la science géométrique *stricto sensu* est libre de toute référence temporelle, quand cette dernière est omniprésente dans l'approche différentielle. On retrouve même une forme d'effacement du temps dans la notation différentielle de Newton, par exemple lorsqu'il définit la vitesse comme la dérivée temporelle de la position et l'accélération comme celle de la vitesse :

$$v = \dot{x} \quad ; \quad a = \dot{v} = \ddot{x}$$

Dans la *Solution analytique*²¹ qu'elle adjoint à sa traduction des *Principia*, c'est en revanche la notation plus explicite de Leibniz :

$$v = \frac{dx}{dt} \quad ; \quad a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$$

(où t dénote bien sûr la variable temporelle) que choisit Émilie du Chatelet pour sa retranscription des démonstrations dans une approche différentielle.

1.4 Le seau de Newton

Au-delà de la reconnaissance et du prestige immédiats que la publication des *Principia* a conférés à Newton, l'histoire de la lente appropriation — et du nettoyage conceptuel et formel — de la mécanique newtonienne par la communauté scientifique aux XVIII^e et XIX^e siècles dépasserait largement le cadre de cet article. On pourra par exemple se rapporter à *La Naissance de la mécanique analytique* de Michel Blay²², à *L'Évolution de la Mécanique* de Pierre Duhem²³ ou encore, pour une analyse plus physicienne, à *La Mécanique* d'Ernst

21. Émilie du Chatelet, « Solution analytique des principaux problèmes qui concernent le Système du monde » (1756) ; in *Principia*, pp. 508-626.

22. Michel Blay, *La Naissance de la mécanique analytique : la science du mouvement au tournant des XVII^e et XVIII^e siècles* (1847-1848), Paris : PUF, 1992.

23. Pierre Duhem, *L'Évolution de la mécanique* (1905), Paris : Vrin, 2000.

Mach²⁴. De même, l'influence de Newton et des notions de temps et d'espace absolus sur la métaphysique kantienne²⁵ est bien connue des historiens de la philosophie. En ce qui concerne l'action à distance, toutefois, pas plus le principe d'une interaction gravitationnelle instantanée et de portée infinie que celui de la distinction entre forces réelles et apparentes ne sont véritablement remis en cause jusqu'à la fin du XIX^e siècle.

Fidèle à son sous-titre, *La Mécanique. Exposé historique et critique de son développement* propose la première mise en opposition sérieuse des préjugés métaphysiques des *Principia* avec une lecture de la relativité galiléenne incluant le concept newtonien de l'action gravitationnelle à distance. Mach y souligne en particulier l'ambiguïté de la notion de masse chez Newton, qui la définit seulement comme une « quantité de matière » (Déf. Première^{26a}), directement liée à la quantité de mouvement cartésienne [$p = mv$], mais la fait également intervenir dans la définition de l'attraction gravitationnelle [$F = G m_1 m_2 / d^2$] sans distinguer explicitement²⁷ ces deux propriétés (*masse inertielle* et *masse pesante*, dans le lexique de Mach), ni *a fortiori* justifier leur équivalence.²⁸

Mach procède en outre à un retournement radical de l'expérience dite du « seau de Newton », exposée « *comme [Newton l'avait] éprouvé* » dès la première Scholie des *Principia*. Lorsqu'un seau et l'eau qu'il contient sont en rotation, un ménisque se forme (Fig. 1c) : « *L'ascension de l'eau vers les bords du vase marque l'effort qu'elle fait pour s'éloigner du centre de son mouvement* ». Or, si l'on met soudainement en rotation un seau plein d'eau initialement au repos (Fig. 1a), le contenu ne sera que progressivement entraîné par le récipient, par l'intermédiaire des frottements ; dans l'intervalle, sa surface restera plane (Fig. 1b) : « *L'effort que faisait l'eau pour s'éloigner de l'axe de son mouvement, ne dépendait donc point de sa translation du voisinage des corps ambiants* »^{26b}. Or si la formation du ménisque, associé au mouvement de rotation absolu du liquide, ne dépend pas directement du mouvement de son environnement, en l'occurrence le seau, « *par*

24. Ernst Mach, *La Mécanique. Exposé historique et critique de son développement* (*Die Mechanik in ihrer Entwicklung. Historisch-kritisch dargestellt*, 1883) ; Paris : Jacques Gabay, 1987.

25. Emmanuel Kant, *Histoire naturelle générale et théorie du ciel. Essai sur la constitution et l'origine mécanique de l'univers d'après les lois de Newton* (*Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels*, 1755) ; Paris : Vrin, 1984.

26. *Principia*, (a). p. 3 ; (b) p. 11.

27. Newton semble pleinement conscient de la nuance et s'attache à établir l'équivalence des deux types de masse par diverses expériences. Il ne la revendique toutefois qu'assez discrètement, dans le corollaire 7 de la proposition XXIV du Livre deux : « *par des expériences très exactes j'ai toujours trouvé que la quantité de matière dans chaque corps était proportionnelle à leur poids* ». *Principia*, p. 223.

28. Ori Belkin, « The History of Newtonian Mass », in *Physical Systems*, chap. 5 ; Dordrecht : Springer, coll. Boston Studies in the Philosophy of Science, vol. 264, 2012, pp. 119-144.

conséquent, le mouvement circulaire vrai ne peut se déterminer par de telles translations »

26b.

D'après Newton, les forces d'inertie sont donc bien des forces fictives qui n'ont pas lieu d'être tant que l'eau est immobile dans l'espace absolu.

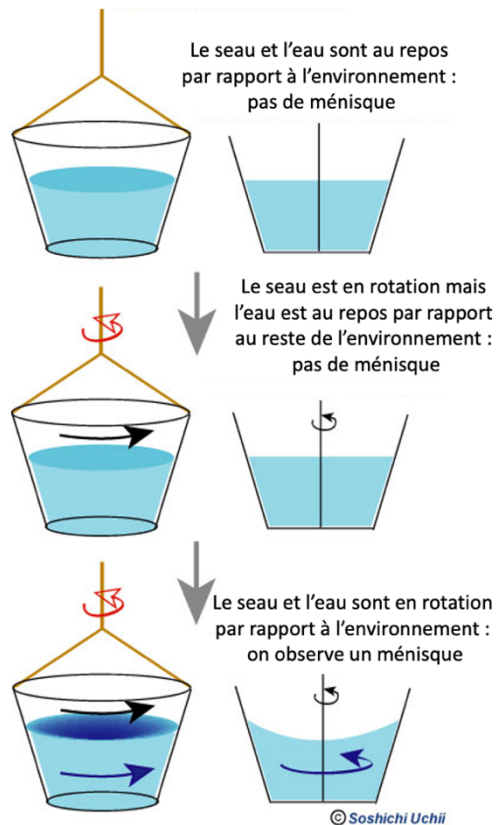


Figure 1 : Expérience de pensée dite du « seau de Newton » :

- Au repos, la surface de l'eau est plane ;
- si l'on met le seau en rotation, l'eau, dans un premier temps, n'est pas entraînée dans ce mouvement et sa surface reste plane ;
- à mesure que les frottements font leur effet, l'eau est progressivement entraînée, jusqu'à partager le mouvement de rotation du seau, et un ménisque se forme.

Mais, objecte Mach, il ne suffit pas de faire tourner le seau, dont la masse est infime au regard de celle de l'univers. Pour que l'expérience soit concluante, c'est tout l'univers, la Terre, le Soleil et les étoiles, qu'il faudrait mettre en rotation autour de l'eau. Mais alors, la surface du liquide ne se courberait-elle pas, du fait de l'action à distance de toutes les masses de l'univers sur ce fluide ? Or si le calcul direct de la résultante de toutes ces actions est impossible, sauf peut-être pour le démon de Laplace, le résultat en est néanmoins parfaitement connu, puisque le problème est formellement équivalent à celui du seau et de l'eau tournant ensemble dans un univers présumé fixe, pour lequel on sait qu'un ménisque se forme.

Cette expérience de pensée iconoclaste rencontre aujourd'hui encore de fortes réticences *a priori*, même de la part de physiciens chevronnés²⁹. Pour autant, Albert Einstein lui-même en a retenu l'idée que « *l'inertie trouve son origine dans une sorte d'interaction entre les corps* », ³⁰ et l'a revendiquée comme l'une des bases de sa théorie de la relativité générale.

2. Action à distance ou champs locaux ?

Des approches alternatives à la pensée newtonienne se manifestent toutefois dès le XVIII^e siècle. Mathématicien et physicien, Leonhard Euler introduit la notion de fonction continue [et sa notation $f(x)$] et développe une « mécanique des milieux continus ». Ainsi, dans sa *Mécanique* (1736),³¹ l'écoulement d'un fluide est caractérisé par la fonction déterminant la vitesse de ce dernier en chaque point et à chaque instant [$v(x,y,z,t)$].

C'est toutefois à d'autres domaines de la physique, l'étude de l'électricité et du magnétisme, qu'il reviendra de dépasser l'idée newtonienne d'action à distance. Alors qu'André-Marie Ampère en propose au tournant du XIX^e siècle une théorie assez analogue à celle de la gravitation newtonienne, Michael Faraday les analyse plutôt en termes d'abord de *lignes de forces*, puis de *champs* remplissant tout l'espace et décrivant une action locale et continue.³²

Très abstraite, la notion de champ électrique ou magnétique est en outre originale du point de vue ontologique³³. Il ne s'agit plus, comme chez Euler, de décrire les propriétés d'un objet physique bien réel, ou même de l'espace ; ni comme chez Newton d'envisager l'action à distance d'un objet sur un autre. Ce que définissent ces champs, c'est l'action *hypothétique* que subirait une charge électrique imaginaire, dotée ou non d'une certaine vitesse, *si* on la plaçait en tel ou tel point de l'espace.

29. Estelle Blanquet & Éric Picholle, « Emergence of conformist thinking under strong paradigmatic pressure : the case of (Galilean) relativity » ; preprint accessible en ligne : https://www.researchgate.net/publication/337772092_Emergence_of_conformist_thinking_under_strong_paradigmatic_pressure_The_case_of_Galilean_relativity (mars 2023).

30. Lettre d'Albert Einstein à Ernst Mach du 25 juin 1913 ; in C.W. Misner, K.S. Thorne & J.A. Wheeler, *Gravitation*, Princeton Univ. Press, 2017 ; pp. 544-545.

31. Leonhard Euler, *Mechanica sive motus scientia analytice exposita* (1736) ; Leipzig : Teubner, 1912.

32. Michael Faraday, *Experimental Researches in Electricity* (1839), Dover Publications, 2004.
Ernan McMullin, « The Origins of the field concept in physics », *Physics in Perspective*, 4, pp. 13-39, 2002.

33. Pour une analyse proprement ontologique (simondonienne, en l'occurrence), voir par exemple « L'Origine scientifique du concept de champ », in Michaël Crevoisier, *Modifications du transcendantal : Sociologie, phénoménologie et ontogénèse*, thèse de doctorat à l'Univ. Franche-Comté, nov. 2021, pp. 616-630 (Part. 3, §3).

Reine incontestée des sciences et modèle des autres disciplines depuis deux siècles, la mécanique newtonienne se voit donc concurrencée, à la fin du XIX^e siècle, par l'émergence d'autres disciplines scientifiques. La théorie de l'électromagnétisme, en particulier, introduite en 1860 par James Clerk Maxwell, trouve progressivement son élégante forme vectorielle. Il s'avère même rapidement possible de retourner l'analogie et de définir également un champ gravitationnel, et le *potentiel* dont il dérive, sur le modèle du champ et du potentiel électriques.

3. Action à distance et relativité du mouvement

C'est également de l'électromagnétisme qu'est venue la remise en cause des principes de base de la physique newtonienne. Expérimentalement, d'abord, avec la démonstration par Albert Michelson, en 1887, que la lumière ne respecte pas la loi newtonienne dite de composition des mouvements³⁴. Théoriquement, ensuite, avec la mise en évidence d'un corollaire inattendu des principes newtoniens : si l'on admet que les monopôles magnétiques, jamais observés, n'existent pas sur Terre, on peut montrer que ce résultat n'est plus valide dans les référentiels en translation par rapport à ce référentiel terrestre³⁵, qui apparaît donc singulier, en contradiction avec la notion même de relativité du mouvement.

Le réflexe naturel du physicien est alors de remettre en cause la théorie menant à ce type de paradoxe. Pourtant, la toute jeune théorie électromagnétique de Maxwell se révèle déjà si puissante et efficace que l'on tente de la sauver par tous les moyens. De leur côté, les résultats expérimentaux de Michelson apparaissent également tout à fait robustes et reproductibles.

Un moyen de lever la difficulté pourrait être de remettre en cause d'autres concepts — en l'occurrence de « bricoler des hypothèses » sur le temps et l'espace. George FitzGerald (1889) et Hendrik Lorentz (1892) montrent ainsi indépendamment qu'une solution formelle

34. Lorsqu'un objet se déplace à une vitesse v_1 dans un référentiel lui-même en mouvement à une vitesse v_2 par rapport à un autre référentiel, son mouvement apparent dans le second référentiel sera la composition de ces mouvements, et sa vitesse $v_1 + v_2$. Ainsi, si un train avance à 60 km/h par rapport au quai, et que l'un de ses passager marche lui-même à 6 km/h dans le couloir du train, sa vitesse mesurée depuis le quai sera de 66 km/h. On pourrait être tenté d'en déduire que, si la lumière se propage à la vitesse c par rapport à la lampe qui l'a émise, dans un référentiel où cette lampe est elle-même en mouvement à une vitesse v_2 , on devrait mesurer pour la lumière une vitesse $v_2 + c$. Or Michelson mesure une vitesse constante, c , quel que soit le mouvement de la lampe.

35. Appliquée dans un cadre strictement newtonien, la théorie maxwellienne suggère qu'un observateur en mouvement par rapport à un laboratoire terrien, dans lesquels aucun monopôle magnétique n'a jamais été observé, ne pourrait interpréter les phénomènes observés qu'en supposant l'existence de tels objets. Les référentiels terrestres jouiraient donc d'une singularité inexplicable sauf à invoquer un privilège mystique, irrecevable d'un point de vue galiléen. Au tournant du XX^e siècle, la mécanique newtonienne et le jeune électromagnétisme maxwellien peuvent donc apparaître incompatibles.

serait d'introduire une contraction, respectivement, des distances et du temps dans les équations décrivant l'électromagnétisme des corps en mouvement.

3.1 Relativité restreinte et jumeaux de Langevin

Si FitzGerald et Lorentz considèrent ces contractions comme de purs artifices mathématiques, le philosophe et mathématicien Henri Poincaré n'hésite pas, en 1902, à affirmer la primauté de ce qu'il nomme le *Principe de relativité*,³⁶ c'est-à-dire l'idée que la physique doit être la même dans tous les référentiels³⁷. Albert Einstein proposera pour sa part en 1905 sa théorie dite de la Relativité restreinte, dans laquelle il affirme le caractère physique de la contraction des distances et des durées dans des référentiels en translation. Il remplace même les concepts d'espace et de temps, rendus obsolètes dans ce contexte, par celui d'*espace-temps*.

Une telle révolution conceptuelle implique évidemment une relecture en profondeur de la notion d'action à distance. En effet, chez Newton, le fait qu'un observateur ne se situe pas dans un référentiel absolu ne remet aucunement en cause la notion de *simultanéité* : la cause et l'effet d'une action à distance instantanée, comme celle de la gravité, seront toujours simultanées, quel que soit le référentiel dans lequel on les observe.

Or un corollaire peu intuitif de la contraction relativiste des durées est le renoncement à cette notion entre deux référentiels en mouvement rapide l'un par rapport à l'autre. Une illustration en est donnée par l'expérience de pensée dite des « jumeaux de Langevin »³⁸. Deux jumeaux âgés de 20 ans se séparent : l'un reste sur Terre, l'autre embarque dans un vaisseau spatial atteignant rapidement une vitesse relativiste telle que le coefficient de contraction temporelle γ vaut dix. Dix ans plus tard, dans le référentiel de la Terre, le jumeau terrien fête son 30^e anniversaire alors que son jumeau, qui a vieilli dix fois moins vite, ne fête que son 21^e anniversaire dans le vaisseau.

36. Henri Poincaré, *La Science et l'hypothèse* (1902) ; Paris : Flammarion, coll. Champs science, 2017.

37. Ce qui ne signifie pas que les phénomènes observés dans deux référentiels distincts soient nécessairement les mêmes, ni même que les lois physiques y aient la même expression. Bien au contraire, c'est même souvent la simplicité de l'expression d'une loi particulière dans un référentiel donné qui amènera à le choisir pour y décrire les phénomènes.

38. Proposée en 1910 par Paul Langevin sous l'appellation de « Boulet de Jules Verne ». On peut noter le glissement sémantique, de l'accent sur l'espace de *Autour de la Lune* de Verne à celui sur le temps de la notion de jumeaux, ainsi que l'escamotage de l'idée de demi-tour.

Premier paradoxe : nos deux « jumeaux » n'ont plus le même âge. Mais les choses se compliquent si on les considère dans le référentiel du vaisseau. Par définition, ce dernier est immobile dans son propre référentiel. Dans ce dernier, c'est donc la Terre qui s'éloigne à une vitesse relativiste ; en appliquant le même raisonnement que précédemment, lorsque le jumeau du vaisseau fête son 21^e anniversaire, son frère terrien, qui a vieilli dix fois moins vite³⁹, n'a donc vu s'écouler qu'un dixième d'année, et n'a par conséquent qu'un peu plus de vingt ans et un mois... Ce ne sont pas du tout les mêmes événements qui se déroulent sur Terre « simultanément » avec le 21^e anniversaire du jumeau du vaisseau, selon que l'on considère cet événement dans l'un ou l'autre référentiel.

Pire : l'ordre de certains événements s'y inverse. Les notions mêmes de passé et de futur deviennent relatives. Dans le référentiel de la Terre, le 21^e anniversaire du jumeau terrien advient bien avant celui de son jumeau voyageur — et inversement dans le référentiel du vaisseau. Cela n'a aucune conséquence dans la mesure où les deux anniversaires ne dépendent aucunement l'un de l'autre, même s'ils sont corrélés par l'histoire commune des jumeaux ; mais *quid* de deux événements liés par une action à distance ? L'effet d'une telle action peut-il être amené à en précéder la cause ?

Pour sauver le principe de causalité, la théorie einsteinienne de la relativité restreinte est donc amenée à postuler l'impossibilité de transporter la moindre information⁴⁰ à une vitesse supérieure à une célérité-limite c , généralement identifiée à la vitesse de la lumière dans le vide⁴¹. Un corollaire direct est non seulement l'impossibilité de toute action à distance instantanée, mais même de toute action à distance hors d'un « cône de lumière » délimitant, dans l'espace-temps, les événements futurs susceptibles d'être affectés par une action à distance transmise à la vitesse limite c . Dans la mesure où, dans aucun référentiel, ces événements ne peuvent survenir *avant* un événement présent, dont ils pourraient être l'effet,

39. $\gamma = 10$, dans les deux référentiels, puisque ce coefficient ne dépend que de la vitesse relative de la Terre et du vaisseau, qui est la même quel que soit le point de vue considéré.

40. Ou d'ailleurs la moindre énergie. Dès 1913 Arnold Sommerfeld et Léon Brillouin notaient que cette limitation ne porte que sur les deux *vitesse de transport de l'information* et de *transport de l'énergie*. Toutes les autres définitions de vitesses associées à la lumière — vitesses de groupe, de phase, de signal, de front, etc. — ouvrent la possibilité de supraluminicité. Léon Brillouin, *Wave Propagation and Group Velocity*, New-York : Academic Press, 1960. En régime non linéaire, c'est en particulier le cas de la *vitesse de signal*, qui correspondrait, pour une particule, à la vitesse newtonienne, qui peut être supraluminique, dès lors qu'aucune information n'est impliquée. Éric Picholle, Carlos Montes, Claude Leycuras, Olivier Legrand et Jean Botineau, « Observation of superluminal solitons in a Brillouin fiber ring laser », *Physical Review Letters*, **66**, 11, 1991, pp. 1454-1457.

41. Ce qui revient à présumer que la lumière n'a pas de masse, tout objet dépourvu d'inertie se propageant à la célérité c dans la théorie de la relativité restreinte.

on parle traditionnellement de *futur absolu*. Symétriquement, on définit de même un *passé absolu*, par le cône délimitant les événements susceptibles d'être la cause d'un événement présent, et qui ne sauraient advenir après lui dans aucun référentiel. (Fig. 2)

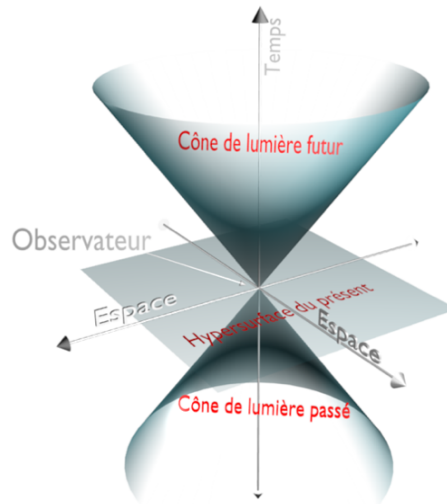


Figure 2 : Cône de lumière dans l'espace-temps de la relativité restreinte. L'extérieur du double cône constitue l'*ailleurs absolu*, inaccessible à toute action à distance (Origine : Wikimedia)

Une action à distance ne peut donc plus affecter n'importe quelle région de l'espace-temps. Tout ce qui se trouve à l'extérieur de ces deux cônes constitue l'*ailleurs absolu* : un événement situé dans cette région de l'espace-temps ne pourra ni être lui-même influencé par une action commise ici et maintenant, ni l'avoir influencée.

3.2 Relativité générale, géométrisation de la gravitation et non-linéarité

Les choses se compliquent encore considérablement lorsque les vitesses impliquées ne sont pas constantes, par exemple si le plan de vol du vaisseau prévoit qu'il inverse sa propulsion pour « faire demi-tour », ou encore s'il se rapproche assez d'une étoile pour en subir fortement l'action gravitationnelle. On pourrait déduire de l'expérience de pensée des jumeaux que, dans ces conditions, le battement des horloges distantes ne dépend plus seulement des vitesses, mais également des *distances* impliquées,⁴² mais cela dépasserait le cadre de ce tour d'horizon.

Dès 1907, Albert Einstein fait un pas de plus en constatant que l'effet d'un champ gravitationnel sur les horloges est le même que celui des effets inertiels dans un référentiel

42. Voir par exemple Estelle Blanquet & Éric Picholle, « Temps personnel et (pseudo-)paradoxes einsteiniens », in *Le Temps*, Nice : Somnium, 2017, pp.106-116. Accessible en ligne : https://www.researchgate.net/publication/358604472_Temps_personnel_et_pseudo-paradoxes_einsteiniens (mars 2023)

accéléré.⁴³ Il en déduira « *l'idée la plus heureuse de toute [sa] vie* »^{43a}, qu'il nommera « principe d'équivalence » : le champ de gravitation — c'est-à-dire l'action gravitationnelle à distance — n'a lui non plus qu'une existence relative, et il n'y a aucun moyen physique de distinguer masse inertielle et masse pesante.

L'inertie n'étant plus qu'un cas particulier de la gravitation, Einstein développe en 1915 sa théorie dite de la Relativité générale, basée sur une géométrie non-euclidienne de l'espace-temps : celui-ci présente en tout lieu une courbure résultant de la position des différentes masses présentes dans le monde. La lumière elle-même ne s'y propage plus en ligne droite, mais suit les *géodésiques* définies par cette géométrie (Fig. 3), qui en constituent localement les “lignes droites”.

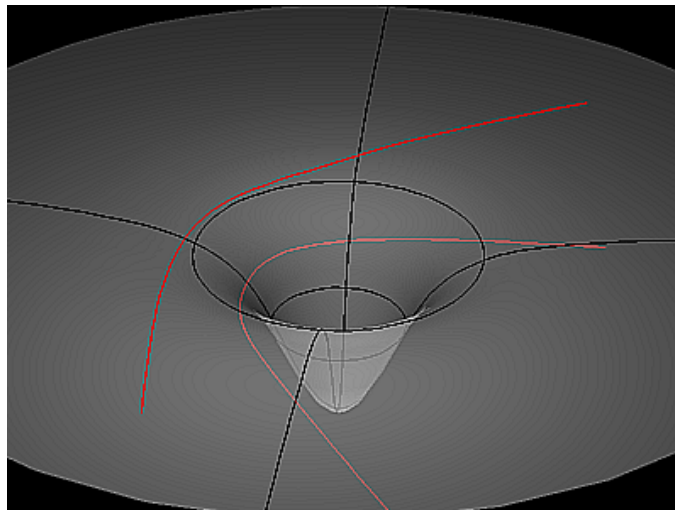


Figure 3 : Géodésiques dans un espace-temps courbe (source : Wikimedia)

De même, l'action gravitationnelle à distance y est remplacée par une sensibilité à la courbure locale de l'espace, qui peut être modifiée par le passage d'*ondes gravitationnelles* se propageant à la vitesse c lorsque des masses lointaines entrent en mouvement. Si ces dernières ont finalement pu être observées en 2015, on est encore loin de savoir les produire ou les manipuler pour faire enfin de la physique de la gravitation une science expérimentale⁴⁴.

Plus généralement, un corollaire de la théorie de la relativité générale est son caractère irréductiblement *non linéaire* : le mouvement des corps y dépend de la courbure locale de

43. Albert Einstein, « Du principe de relativité et des conséquences tirées de celui-ci » (« *Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen* », in *Œuvres choisies, t. 2, Relativité I* ; Paris : Seuil & Éditions du CNRS. 1993, pp. 84-124. (a) en 1919 ; cité dans l'introduction à cet article, p. 83.

44. « *Depuis le début du [xx^e] siècle, nous avons accumulé une énorme quantité de savoir (...) Mais si l'on considère la gravitation, sa nature, sa propagation, nous devons admettre franchement que les progrès ont été presque nuls. (...) Dans la recherche scientifique, il n'existe pas de substitut à l'observation.* » se lamentait déjà Léon Brillouin voici un demi-siècle. L. Brillouin, *Relativity Reexamined*, New York : Academic Press, 1970, pp. 103-104.

l'espace-temps, elle-même déterminée par la position des corps, donc par leur mouvement, qui dépend de la courbure, etc.⁴⁵ Mais surtout, pour Albert Einstein, la physique de la gravitation est simple lorsqu'on l'analyse localement⁴⁶ — et seulement dans ce cas, ou presque.

4. L'action à distance dans le monde quantique

4.1 « Première quantification » et dualité onde-particule

Ce n'est pourtant pas pour ses théories de la Relativité qu'Albert Einstein recevra en 1921 le Prix Nobel de physique, mais pour son interprétation (en 1905 également, son « année miraculeuse ») de l'effet photoélectrique. Elle est fondée sur l'idée que les *quanta* de lumière théorisés par Max Planck dès 1900 ne sont pas de simples artifices de calcul, mais bien des objets physiques. Il ne s'agit toutefois à ce stade de quantifier que des actions locales, liées à l'absorption ou à l'émission de *photons*⁴⁷ par la matière : l'énergie lumineuse s'échange par paquets, dotés d'une énergie d'autant plus forte que la fréquence est élevée [$E = h\nu$].

L'idée que la lumière, dont la nature ondulatoire ne semblait plus faire de doute depuis l'adoption de la théorie électromagnétique de Maxwell, puisse présenter un tel comportement corpusculaire sera bientôt reprise, retournée et généralisée par Louis de Broglie. Ce dernier introduit en 1924 la *dualité onde-particule* : s'il faut associer à toute onde électromagnétique des photons au comportement corpusculaire, il convient également d'associer à toute particule une onde dont la longueur d'onde ne dépend que de sa quantité de mouvement p [$\lambda_{dB} = h/p$]. Une particule se trouve donc associée à une onde plane monochromatique — qui par définition remplit tout l'espace si sa quantité de mouvement est parfaitement déterminée.

La question d'ordre ontologique de l'interprétation de cette *fonction d'onde* (souvent notée Ψ) occupe l'essentiel des débats du Congrès Solvay de 1927, généralement considéré comme l'acte de naissance de la physique quantique, et fait encore couler beaucoup d'encre

45. Un phénomène est dit linéaire lorsqu'un doublement de la cause produit un doublement de l'effet, comme c'est généralement le cas en physique newtonienne (e.g. une masse double induira une force d'attraction double, donc une accélération double). Une physique non-linéaire, comme la relativité générale, présente des effets de seuil : « linéarisable » en deçà, elle peut exhiber des phénomènes nouveaux et contre-intuitifs au-delà. La RG est ainsi essentiellement réductible à la physique newtonienne aux faibles champs gravitationnels, cette dernière restant donc parfaitement adaptée à la « vie de tous les jours » dans notre système solaire ; mais elle prévoit également des phénomènes plus exotiques au voisinage de très fortes masses.

46. *Gravitation*, op. cit., pp. 4 & 19.

47. Le terme lui-même n'apparaîtra qu'en 1926, dans une lettre à *Nature* de Gilbert N. Lewis.

tout au long du XX^e siècle. Mais la principale pierre d’achoppement, qui donne lieu à une fructueuse polémique entre Albert Einstein et Niels Bohr concerne en fait la question de l’interaction à distance d’objets quantiques fortement corrélés (« paradoxe E.P.R. »). Le concept même d’action à distance conserve-t-il encore un sens dans ce contexte ?

Pour les tenants de l’*interprétation de Copenhague* (Bohr, Heisenberg) — ultra-dominante parmi les physiciens de 1927 aux années 1980 —, la fonction d’onde n’est qu’une abstraction mathématique décrivant la *densité de probabilité de présence* d’un objet quantique en chaque point de l’espace, comme le suggéraient en 1926 Max Born et Wolfgang Pauli. Le formalisme mathématique pourrait même être la seule façon légitime de décrire le monde quantique, à l’exclusion même, pour certains, du langage naturel.⁴⁸ Pour les réalistes (Einstein, de Broglie...), en revanche, la fonction d’onde a bien une réalité physique : si la composante ondulatoire des objets quantiques qu’elle décrit reste inaccessible à toute mesure directe dans l’état actuel des techniques, ce qui justifie souvent un traitement probabiliste, elle n’en reste pas moins soumise aux limitations communes à tous les objets physiques, comme l’impossibilité de transporter de l’information à une vitesse supérieure à celle de la lumière.

4.2 Le bestiaire de la « seconde quantification »

En dépit de la puissance du formalisme quantique et de l’algèbre d’opérateurs introduit par Werner Heisenberg en 1925,⁴⁹ de tels débats perdent toutefois une part de leur acuité si l’on se souvient que l’on ne sait encore décrire rigoureusement, d’un point de vue quantique, que des objets extrêmement simples, comme une particule individuelle. Les problèmes plus complexes (ou moins idéaux), prenant en compte l’existence d’un nombre significatif de corps et *a fortiori* leurs interactions, font appel à un formalisme plus sophistiqué encore, celui de la « seconde quantification », introduit par Paul Dirac début 1927⁵⁰.

48. « Ne vous exprimez jamais plus clairement que vous ne pensez », enjoint même Niels Bohr à ses élèves. Cité par Abraham Pais, in « Einstein and the quantum theory », *Review of Modern Physics*, **51**, 4, pp. 853-913 (1979). Voir aussi Michel Bitbol, « Autonomie et ontologie (l’interprétation du formalisme quantique dans les années 1930) », in *Le Formalisme en question. Le tournant des années 1930*, dir. F. Nef & D. Vernant, Paris : Vrin, pp. 193-214 (1998).

49. Heisenberg décrit chaque mesure réalisée sur un système quantique par un opérateur matriciel, dont les différents résultats possibles de cette mesure sont les *valeurs propres*. Ainsi, l’énergie est une valeur propre de l’opérateur hamiltonien, H . L’algèbre des matrices étant non commutative (i.e. $AB \neq BA$) les résultats de deux mesures consécutives *a priori* indépendantes peuvent dépendre de l’ordre dans lequel on les réalise, ce qui est à l’origine des *relations de conjugaison* de Heisenberg.

50. Paul Adrien Maurice Dirac, « The Quantum Theory of the Emission and Absorption of Radiation », *Proceedings of the Royal Society A*, **114**, 767, 1927, p. 243.

Le trait le plus notable de ce formalisme est l'introduction d'opérateurs « création » $[a^\dagger]$ et « annihilation » $[a]$ modifiant le « nombre d'occupation » d'un état possible du système. Il ne s'agit plus de se demander dans quel état se trouve tel ou tel objet quantique individuel, mais *combien* d'objets quantiques sont créés ou retranchés d'un état donné du système complet.

Dans l'idéal, si l'on savait décrire complètement ces états, ce formalisme serait en principe aussi simple d'emploi que d'interprétation. Mais, par construction, ce n'est presque jamais le cas. La rançon des inévitables simplifications que l'on s'autorise pour se ramener à des états connus (ou du moins raisonnablement calculables) est l'apparition d'un bestiaire⁵¹ quantique parfois inattendu.

Photons virtuels

S'autoriser, pour se ramener à des cas mieux connus, à envisager un électron ou un atome comme un objet isolé, comme s'il était seul dans l'univers, constitue en effet une approximation brutale. Dans le lexique de l'électrodynamique quantique, une telle représentation très simplifiée du monde constitue une *jauge*⁵².

Dans ce type d'approche, on peut être amené à rabouter artificiellement deux représentations quantiques indépendantes pour prendre malgré tout en compte l'interaction entre deux objets que l'on avait précédemment décrits comme s'ils étaient isolés. La question de leur interaction apparaît alors comme une *perturbation* du caractère *a priori* isolé de chacun.

De telles perturbations, qui portent tout le poids des insuffisances d'un modèle simplifié à l'excès, se traduisent par l'apparition de *particules virtuelles*. Ces dernières réifient, et compensent, le renoncement à prendre en compte une action à distance dans les représentations initiales des objets quantiques. Leur comportement peut donc s'avérer

51. Les physiciens parlent volontiers, informellement, de « zoologie ».

52. Les théories de jauge sont un arsenal mathématique permettant de définir les opérateurs (Lagrangien L , Hamiltonien H , etc.) qui décrivent l'évolution des fonctions d'onde, *via* par *exemple* l'équation de Schrödinger ($H\Psi = E\Psi$). Elles garantissent en particulier leur stabilité au regard d'un certain nombre de transformations permises (« invariance de jauge »). Le choix de la jauge revient entre autres à définir la nature exacte des photons, *via* le Hamiltonien : $H_{int} = h\nu(aa^\dagger + 1/2)$. Le photon peut alors être rigoureusement (quoiqu'un peu circulairement...) défini comme ce qui est créé (resp. annihilé) par l'opérateur création (resp. annihilation). Les transformations (y compris les actions à distance non permises dans une jauge donnée) sont alors traitées comme des perturbations. Concrètement, sauf dans les cas les plus simples (un atome d'hydrogène seul dans l'univers, deux particules en interaction, etc.), ces calculs deviennent rapidement excessivement compliqués.

paradoxal. Dans certains cas, ces particules fictives peuvent par exemple aller plus vite que la lumière, voire remonter le temps, etc.

Ce que l'on aurait au début du XX^e siècle interprété comme une répulsion à distance entre deux électrons du fait de leur interaction électromagnétique se traduit ainsi, en termes de théorie quantique des champs, par l'échange d'un photon virtuel entre ces deux particules supposément isolées (Fig. 4).

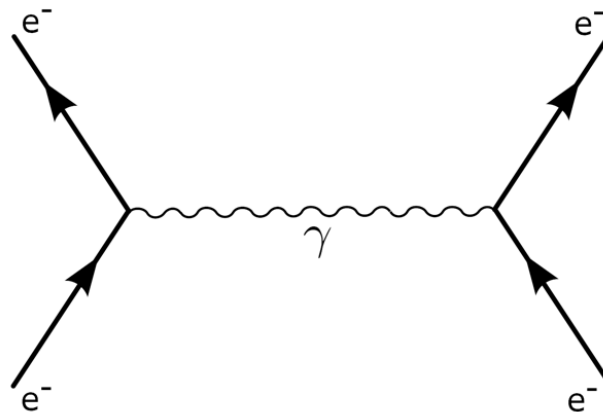


Figure 4 : Diagramme de Feynman élémentaire : représentation de l'action à distance entre deux électrons supposément isolés par échange d'un photon virtuel γ (source : Wikimedia)

Atomes et photons habillés

Une stratégie alternative⁵³ consiste à prendre en compte dans la description même des objets quantiques celle des interactions qu'ils subissent du fait de leur environnement (autres objets quantiques, champs électromagnétiques, etc.). On parle alors d'*états habillés*. Dans les cas simples, comme celui d'un seul atome en interaction avec un faisceau laser, on peut en donner des représentations assez lisibles (les états quantiques s'interprétant alors comme l'atome habillé par un photon, par deux photons, etc.)

Lorsque l'objet d'intérêt n'est pas matériel — par exemple lorsque l'on modélise la propagation de la lumière elle-même — on peut également choisir de considérer plutôt des *photons habillés*. En fonction de son action sur le milieu qu'il traverse,⁵⁴ un photon s'y revêt

53. Ou complémentaire : si les interactions sont prises en compte incomplètement dans la définition des états habillés, on peut par exemple être amené à décrire un échange de photon virtuel entre deux atomes habillés....

54. Un faisceau lumineux s'accompagne au moins, par construction, d'un champ électrique et d'un champ magnétique qui vont agir sur le milieu, y compris à quelque distance, par le biais de l'*électrostriction* et de la *magnétostriction*. L'action de la lumière sur le milieu peut être encore bien plus complexe si ce dernier présente en outre de fortes non-linéarités.

par exemple d'une quantité de mouvement empruntée à ce milieu : son impulsion canonique⁵⁵ est alors augmentée de celle des *phonons* qui l'habillent, restituée au milieu dès qu'il en sort (Fig. 5).

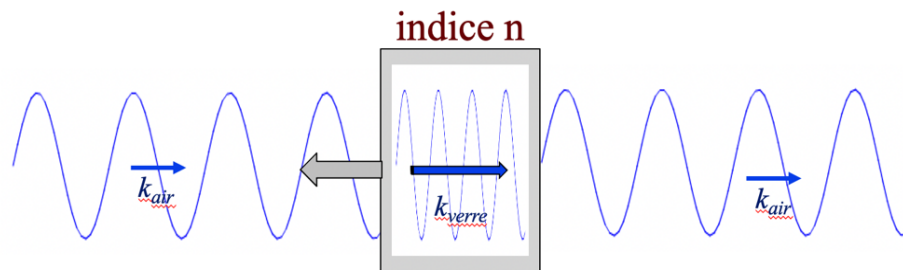


Figure 5 : Lorsqu'un photon de fréquence ν traverse un diélectrique (e.g. une lame de verre) d'indice n ($\approx 1,5$), son impulsion canonique ($p_{\text{verre}} = n h \nu / c$) y est plus grande que dans l'air ($p_{\text{air}} = h \nu / c$)

Si ces débats sont restés essentiellement abstraits durant la première moitié du XX^e siècle, l'émergence des premières applications concrètes de la théorie quantique, de l'arme nucléaire (1945) au transistor (1947) et au laser (1958), a permis de confronter ses prédictions à l'expérience et d'en démontrer la pertinence. Bien que les enjeux interprétatifs, d'ordre métaphysique, restent ouverts, le consensus semble fermement établi sur les questions de formalisme.

L'interaction électromagnétique, de portée infinie et dont le vecteur (« *boson intermédiaire* ») est le photon, est ainsi décrite avec une formidable précision par l'électrodynamique quantique (QED), aujourd'hui capable de prédire la valeur de certaines grandeurs fondamentales, comme la « constante de structure fine », avec onze chiffres significatifs, en parfait accord avec les expériences⁵⁶.

4.3 Des vecteurs d'interaction plus exotiques

Deux autres interactions à plus courte portée, l'interaction nucléaire faible, responsable en particulier de la radioactivité β , et l'interaction nucléaire forte, responsable de la cohésion des noyaux atomiques, sont quant à elles décrites par la chromodynamique quantique (QCD). L'interaction faible est causée par l'échange de différents types de bosons : W^+ , W^- et Z^0 ,

55. R.N.C. Pfeifer, T.A. Nieminen, N.R. Heckenberg & H. Rubinsztein-Dunlop, « Momentum of an electromagnetic wave in dielectric media », *Review of Modern Physics*, **79**, pp. 1197-2016, 2007.

56. e.g. Léo Morel, Zhibin Yao, Pierre Cladé et Saïda Guelatti-Khélifa, « Determination of the fine-structure constant with an accuracy of 81 parts per trillion », *Nature*, **588**, pp. 61-65, 3 déc. 2020.

observés au CERN en 1983. Les vecteurs de l'interaction forte sont pour leur part appelés des *gluons*.

Les efforts d'unification des différentes théories ont abouti à ce qu'il est convenu d'appeler le *modèle standard*, introduisant encore de nouveaux bosons intermédiaires, comme le boson de Higgs, observé pour la première fois en 2012 et qui « porte » les trois interactions (électromagnétique, faible et forte).

Graal de la physique théorique du XX^e siècle, la « grande unification », qui inclurait enfin la quatrième interaction, la gravitation, dans une hypothétique « théorie du tout », reste toutefois inaccessible : sans même parler de l'unifier aux trois autres, on ne dispose pas aujourd'hui de modèle quantique un tant soit peu consensuel de la gravitation, ni de vision bien claire de ce que pourraient être (par analogie) ses vecteurs, que certains optimistes nomment pourtant déjà *gravitons*.

5. Auto-action à distance vs. non-localité quantique

5.1 Intrication quantique

Si la représentation d'objets quantiques présumés simples en interaction à distance soulève déjà de profondes difficultés théoriques pour les définir de façon univoque, la théorie quantique prédit en outre l'existence d'une propriété sans équivalent classique, l'*intrication*, susceptible d'induire de fortes corrélations entre des mesures distantes. Résultent-elles encore d'une action à distance ? La question est, encore et toujours, celle de la séparabilité, de la décomposition plus ou moins arbitraire d'un système complexe en deux ou plusieurs sous-systèmes (plus ou moins) séparés. Idéalement, il conviendrait de décrire entièrement l'état quantique du système complet, ce qui se révèle rapidement infaisable dans la plupart des cas. Lorsque l'on peut distinguer des lieux séparés dans lesquels il est susceptible de se manifester, la tentation est alors grande de le décomposer en sous-systèmes locaux correspondant à ces différents lieux.

Ces propriétés d'intrication quantique relèvent même du paradoxe, dans la mesure où elles imposent de renoncer à au moins un parmi les principes (métaphysiques) de causalité et de localité et (logique) d'identité (i.e. principe du « tiers exclu »).

Nous nous en tiendrons ici, dans un souci de (relative) simplicité, au cas de la lumière, donc de l'optique quantique. Certains mécanismes comme la « conversion paramétrique »⁵⁷ permettent, par exemple, de décomposer un faisceau lumineux de haute fréquence (en bleu sur la Fig. 6) en deux faisceaux de fréquence moitié (en rouge) se propageant dans des directions différentes et qui, à la vitesse de la lumière, se retrouvent donc rapidement séparés par des distances conséquentes.

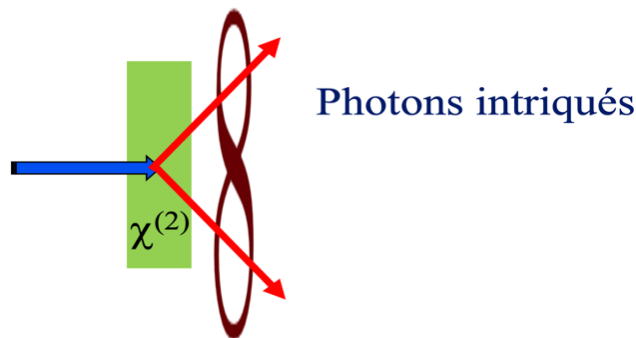


Figure 6 : Schéma de principe de la création de photons intriqués par interaction paramétrique : un faisceau laser (à gauche, en bleu) est décomposé dans un milieu non linéaire (en vert) en deux faisceaux de fréquence moitié (en rouge, à droite). La double boucle curviligne symbolise l'intrication entre les deux composantes.

Comment convient-il alors de décrire, au niveau quantique, les photons produits par une telle interaction, souvent appelés *paire de photons jumeaux* ? S'agit-il de deux objets quantiques distincts, de deux photons bien séparés spatialement quoique susceptibles d'avoir une action à distance l'un sur l'autre ? Ou bien d'un seul objet plus complexe, non local, se manifestant à deux endroits à la fois ?

Quoi qu'il en soit, ayant été créés lors du même processus élémentaire, ces deux objets, ou ces deux composantes d'un même objet plus complexe, présentent de fortes corrélations (Fig. 5). Ils sont ainsi *intriqués* en temps⁵⁸, dans le lexique d'Erwin Schrödinger^{59a} : toute

57. Dans un milieu « non linéaire » (cf. note 45). Par exemple, pour des applications courantes de type télécom, un cristal de niobate de lithium, à la non-linéarité dite de type « $\chi^{(2)}$ ». e.g. Olivier Alibert, Virginia D'Auria, Marc De Micheli, Florent Doutre, Florian Kaiser, Laurent Labonté, Tommaso Lunghi, Éric Picholle et Sébastien Tanzilli, « Quantum photonics at telecom wavelengths based on lithium niobate waveguides », *Journal of Optics*, **18** (10):104001, 2016.

58. Ils présenteront également une intrication du point de vue énergétique : si la fréquence du faisceau initial était ν , la conservation de l'énergie impose que, si la fréquence mesurée de l'un des faisceaux secondaires est $\nu/2 + \varepsilon$, celle de l'autre sera strictement $\nu/2 - \varepsilon$, la somme restant égale à ν (et la somme des énergies à $h\nu$) ; mais ils présenteront aussi une intrication en nombre de photons (puisque le processus de création porte systématiquement sur les deux voies), et éventuellement sur d'autres observables physiques moins intuitives.

59. Erwin Schrödinger, « Discussion of probability relations between separated systems », in *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, **31** (4), 1935, pp. 555–563.

(a) Schrödinger utilise initialement, en allemand, le terme de *Verschränkung* (littéralement « emmêler », « enchevêtrer »), qu'il traduit par *entanglement* dans son article en anglais.

mesure temporelle permettant de remonter à l'instant de leur création donnera le même résultat, qu'elle porte sur l'un ou sur l'autre.

5.2 Le paradoxe E.P.R. : « *spooky action at a distance* » ?

Or une leçon de base de la mécanique quantique, tout à fait consensuelle pour autant que l'on restreigne cette dernière à une théorie de la mesure, est que l'on ne peut connaître simultanément avec une précision extrême les valeurs de certaines grandeurs dites *conjuguées* : l'ordre dans lequel sont pratiquées les deux mesures en affecte le résultat. En l'occurrence, la grandeur conjuguée du temps est l'énergie (relation de conjugaison de Heisenberg : $\Delta t \Delta E \geq \hbar$).

Mais si les résultats des mesures sont strictement corrélés, n'est-il pas possible de mesurer simultanément les valeurs exactes de deux grandeurs conjuguées, une sur chacun des éléments de la paire de photons jumeaux, en violation des relations de Heisenberg ? Mieux, ou pire : si on les laisse se propager un certain temps à la vitesse de la lumière, de manière à ce qu'ils soient séparés d'une distance suffisante pour que chacune des mesures se trouve hors du cône de lumière de l'autre, comment leurs résultats pourraient-ils dépendre l'un de l'autre ? S'agirait-il d'une forme d'action à distance supraluminique, l'information correspondante étant transportée plus vite que la lumière d'un détecteur à l'autre, au risque de violer le principe de causalité (cf. §3.1 *supra*) ?

C'est l'essence du « paradoxe E.P.R. », soulevé par Albert Einstein dès le Congrès Solvay de 1927 et systématiquement analysé par la suite avec ses collaborateurs Boris Podolsky et Nathan Rosen (et dans une moindre mesure Richard Tolman),⁶⁰ avec des réfutations tout aussi systématiques par Niels Bohr. La polémique porte sur la complétude de la mécanique quantique.⁶¹

Dans la vision résolument réaliste d'Einstein, les transferts d'information entre des objets quantiques locaux restent soumis aux limitations de sa théorie de la relativité. La corrélation forte entre mesures distantes doit donc résulter de leur pré-détermination par des *variables cachées*. Bohr lui oppose une vision ultra-formaliste, qui constituera le cœur de ce qu'il est convenu d'appeler l'*interprétation de Copenhague* : un physicien ne connaît jamais que des

60. Abraham Pais, « Einstein and the Quantum Theory », op. cit..

61. Albert Einstein, Boris Podolsky et Nathan Rosen, « Can quantum-mechanical description of reality be considered complete ? », *Physical Review*, **47**, 10, pp.777-780, 1935. Niels Bohr, *idem* (même titre, même revue), **48**, 8, pp. 696-702, 1935.

résultats de mesure, et l'on ne peut donc rien dire de la « réalité », voire de l'existence même d'un objet quantique entre deux mesures. Tout au plus peut-on élaborer des prédictions probabilistes, basées sur l'évolution de la fonction d'onde, pour tenter d'anticiper le résultat des éventuelles mesures à venir.

Un autre réaliste, Louis de Broglie développe une théorie intermédiaire, dite de la *double solution*, dans laquelle des objets localisés et détectables ont, entre deux mesures, des trajectoires bien déterminées, mais influencées par une « onde pilote » non-locale faisant office de variable cachée. De 1927 à 1953, il se ralliera même à l'interprétation « orthodoxe » de Copenhague, aux prédictions statistiques strictement équivalentes, à défaut d'en partager toutes les options métaphysiques.⁶²

Einstein, pour sa part, a toujours maintenu une posture de *réalisme local* — si le résultat d'une mesure est prédéterminé, alors l'information correspondante préexistait nécessairement au niveau de l'objet même sur lequel la mesure est réalisée —, et son corollaire de la *séparabilité* des objets quantiques. Il se refusera toujours à accepter l'« inquiétante action à distance » (*spooky action at a distance*⁶³) par laquelle il interprète l'intrication, et qui lui semble être une conséquence inévitable de l'interprétation de Copenhague :

Je ne puis sérieusement croire [en l'interprétation statistique de la mécanique quantique] parce que la théorie ne peut être réconciliée avec l'idée que la physique se doit de représenter une réalité dans le temps et dans l'espace, libre de toute inquiétante action à distance.^{65a}

À ce stade, le débat reste éminemment abstrait et d'ordre métaphysique autant, sinon plus, que physique. D'une part, en 1927, on ne sait pas encore réellement caractériser, et *a fortiori* manipuler, des objets quantiques individuels : quelque interprétation que l'on favorise à leur propos, une approche statistique s'impose inévitablement dès lors que l'on considère de larges collections d'objets quantiques (donc *a fortiori* le moindre objet macroscopique). D'autre part, on ne dispose pas d'expérience cruciale qui permettrait de départager les différentes options, sur la base de prédictions différentes pour une même observation.

62. Georges Lochak, « L'Évolution des idées de Louis de Broglie sur l'interprétation de la mécanique ondulatoire », in Louis de Broglie, *Les Incertitudes d'Heisenberg et l'interprétation probabiliste de la mécanique ondulatoire*, Paris : Gauthier-Villars, pp. XIII-XXIII, 1982.

63. Si la traduction anglaise de l'expression a fait fortune, elle n'apparaît en fait qu'une fois, en allemand (*spukhafte Fernwirkung*), dans une lettre privée à Max Born : (a) Albert Einstein à Max Born, 3 mars 1947 ; in *The Born-Einstein Letters*, trad. Irene Born, Londres : MacMillan, p. 155, 1971.

5.3 Violation des inégalités de Bell : la fin du réalisme local ?

Ce n'est qu'en 1964 qu'une telle expérience est proposée par John Bell.⁶⁴ Ce dernier développe un critère statistique de corrélation forte entre plusieurs mesures distantes (les *inégalités de Bell*) qui s'impose à toute série de mesures limitées par une contrainte de réalisme local. Or, montre-t-il, ce critère peut être violé dans certaines configurations particulières d'intrication quantique.

Il faut encore attendre quinze ans⁶⁵ avant sa violation expérimentale effective par l'équipe d'Alain Aspect,⁶⁶ et les dernières échappatoires (*loopholes*) n'ont été éliminées que très récemment. En effet, si le choix de mesure pouvait être anticipé, cette information susceptible de justifier à elle seule l'observation de corrélations fortes pourrait être portée par une variable cachée. L'idée générale est donc de ne choisir qu'au tout dernier moment, lorsqu'ils sont suffisamment séparés pour qu'aucun échange « classique » d'information ne soit plus possible entre eux avant qu'on la réalise, le type exact de la mesure à laquelle on soumettra chaque élément d'une paire de photons jumeaux (Fig. 6).

Le verdict des expériences semble sans appel⁶⁷ et réfute l'intuition d'un réalisme local : « *si [une théorie à variables cachées] est locale, elle sera en désaccord avec la mécanique quantique ; et si elle est en accord avec la mécanique quantique, elle ne sera pas locale* »⁶⁸ — du moins si, comme Einstein, on tient pour acquis le principe de causalité et la séparabilité des objets, même quantiques. Soulignons toutefois que, si la violation des inégalités de Bell invalide les théories à variables cachées *locales*, elle n'exclut pas la possibilité de théories non locales, comme chez de Broglie.

64. John Stuart Bell, « On The Einstein-Podolsky-Rosen Paradox », *Physics, Physique, Физика*, **1**, 3, pp. 195-200, 1964.

65. Une première expérience, pionnière mais non entièrement conclusive, avait été menée dès 1972 par John Clauser, co-réceptiendaire avec Alain Aspect du Prix Nobel de physique 2022. Stuart J. Freedman et John F. Clauser, « Experimental test of hidden variable theories », *Physical Review Letters*, **28**, pp. 938-941 (1972).

66. Alain Aspect, Philippe Grangier et Gérard Roger, « Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment : A New Violation of Bell's Inequalities », *Physical Review Letters*, **49**, 2, pp. 91-94 (1982).

67. Sous réserve toutefois d'un « hyperdéterminisme » excluant la possibilité même d'un choix de mesure indépendant (aucun mécanisme réellement aléatoire, aucun libre arbitre de l'expérimentateur, etc.), par exemple en réintroduisant un plan divin capable de prédire les choix de mesure de l'expérimentateur et de préparer le système en conséquence... Les différents *loopholes* éliminés les uns après les autres correspondaient à autant de biais expérimentaux susceptibles, en droit, d'affecter cette indépendance. Voir par exemple Massima Giustina, « On Loopholes and Experiments », in *Quantum [Un]Speakables II. The Frontiers Collection*, dir. R. Bertlmann & A. Zeilinger, Springer, 2017, pp. 485-501.

68. John Stuart Bell, *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, Cambridge University Press, 1987, p. 65.

A contrario, sauf dans les situations très particulières soigneusement mise en place par les spécialistes d'information quantique pour « violer Bell », par exemple dans des applications de cryptographie, les prédictions de la théorie quantique restent, concrètement, indépendantes de l'interprétation, formaliste ou réaliste, que l'on fait de cette dernière. Alors même que le caractère « non-classique » de la mécanique quantique met en évidence l'existence des limites d'une approche naïve⁶⁹ des phénomènes impliquant des objets quantiques individuels, la théorie nous assure que ces limites sont, en pratique, suffisamment éloignées pour que l'on puisse les oublier sereinement dans la vie de tous les jours. De même que les inégalités de Heisenberg montrent que l'on peut presque toujours se contenter d'une approche classique de la mesure,⁷⁰ les inégalités de Bell assurent en fait qu'une vision locale fera l'affaire pour décrire presque toutes les actions à distance.

5.4 Limites quantiques de la notion d'action à distance

Ce détour par la physique quantique met en évidence deux implicites fondamentaux de la notion d'action à distance : on présume généralement, d'une part, qu'il est possible de distinguer (au moins) deux objets susceptibles d'interagir ; et d'autre part qu'il est possible de définir une distance entre eux, ou *a minima* que cette notion est pertinente. Or si ces deux hypothèses tiennent de la tautologie dans le monde classique, il n'en va pas de même dans le monde quantique.

(Dé)cohérence quantique

Nous avons déjà évoqué, à propos des ondes de de Broglie, l'ambiguïté de la notion d'action à distance lorsque la fonction d'onde associée à un objet quantique remplit tout l'espace. Celle-ci dérive d'une autre relation de conjugaison de Heisenberg, cette fois entre la position et la quantité de mouvement [$\Delta x \Delta p \geq \hbar$] : en principe, si la vitesse d'une particule est parfaitement connue, sa position est

69. Le terme est relativement courant dans les échanges informels entre physiciens, mais sans connotation psychologique. Une vision « naïve » d'un problème y est plutôt celle qui se conforme *a priori* à des approximations courantes mais non justifiées dans ce cas particulier.

70. La valeur numérique de la constante de Planck réduite qui intervient dans les relations de Heisenberg, est extraordinairement faible : $\hbar \sim 10^{-34}$ J.s. La relation de conjugaison $\Delta t \Delta E \geq \hbar$ suggère donc que, concrètement, il n'est pas vraiment utile de s'en préoccuper tant que l'on ne tente pas de mesurer, typiquement, des durées inférieures à 10^{-12} s, soit un millième de milliardième de seconde, avec une précision supérieure au cent-millième...

inconnue et sa fonction d'onde est une onde monochromatique, parfaitement cohérente, et inversement⁷¹.

Dans le monde réel, toutefois, aucune de ces grandeurs n'est jamais connue avec une précision infinie, et la fonction d'onde des objets matériels, particules, atomes, etc. n'occupe qu'une région très limitée de l'espace, définie par sa *longueur de cohérence*. Classiquement, aux températures habituelles, cette longueur de cohérence est bien inférieure à la distance entre deux atomes dans un solide ($\sim 10^{-10}$ m), voire au rayon classique de l'atome ($\sim 10^{-12}$ m). On pourrait donc définir la position relative et donc la distance entre deux objets avec une précision de cet ordre, en général plus que suffisante pour analyser l'action à distance de l'un sur l'autre. Mieux : cette distance étant très supérieure à leurs longueurs de cohérence respectives, on peut légitimement les séparer spatialement et l'on n'observe pas de comportements proprement quantiques, à l'exception le cas échéant de l'échange de photons (réels ou virtuels, cf. § 4.2). Tout se passe comme si, du point de vue de leurs propriétés quantiques d'ordre ondulatoire, des objets bien distincts ne se « voyaient » pas.

Il n'en va toutefois plus de même dès lors que la longueur de cohérence associée à chaque objet devient suffisante pour que leurs fonctions d'onde se recouvrent, comme c'est parfois le cas à très (*très !*) basse température. Ainsi, on sait aujourd'hui refroidir des gaz d'atomes à des températures de l'ordre du micro-, voire du nano-Kelvin,⁷² pour obtenir des longueurs de cohérence quantique de l'ordre du centimètre, donc nettement macroscopiques.

On observe alors l'émergence de comportements collectifs sans équivalent classique, voire l'apparition d'états inédits de la matière, comme les *condensats de Bose-Einstein*, au sein desquels la notion d'action à distance entre les atomes qui le constitue perd toute signification : ceux-ci sont alors rigoureusement *indiscernables* entre eux et chaque atome occupe tout l'espace du condensat, d'ailleurs décrit par une unique fonction d'onde. (Rien n'empêche en revanche d'envisager l'action à distance entre deux condensats...)

Plus généralement, l'interaction d'un objet avec le désordre du monde provoque inévitablement une perte progressive, souvent extrêmement rapide, de sa cohérence

71. i.e. si la position d'une particule est parfaitement connue, sa vitesse est inconnue. Dans le cas de la lumière, une autre relation de conjugaison relie le nombre de photons portés par une onde et sa phase : $\Delta n \Delta \varphi \geq 2\pi$.

72. Micro-Kelvin (μK) : un millionième de degré au-dessus du zéro absolu ; nano-Kelvin (nK) : 0,001 μK .

quantique : on parle alors de *décohérence*, dont la phase ultime est l'oubli des propriétés quantiques de l'objet et donc son retour au monde classique et à la séparabilité.

Lorsque les fonctions d'ondes de deux objets se recouvrent et que leur cohérence relative⁷³ est maintenue, la notion dominante est en revanche plutôt celle, ondulatoire, d'*interférence* que celle d'action de l'un sur l'autre.

Une autre difficulté, d'ordre ontologique, apparaît si l'on ne souscrit pas au réalisme einsteinien. L'approche de l'école de Copenhague, et en particulier celle de Heisenberg, consiste à ne jamais manipuler que des résultats de mesure (connus pour les mesures déjà effectuées ou de manière probabiliste pour celles encore à venir), sans jamais présumer de ce qui se passe entre deux mesures. Or qu'en est-il d'objets qui n'ont encore interagi avec aucun appareillage de mesure, et dont on n'a donc même aucun moyen de savoir s'ils existent ou non, au sens habituel du terme ?

Une réponse, proposée par le philosophe Gilbert Simondon, consiste à considérer la mesure comme un *processus d'individuation*⁷⁴ : avant que son existence individuelle ne soit attestée par une mesure spécifique, l'objet quantique se trouve dans un état *préindividuel*. Sans nécessairement renoncer entièrement au réalisme, on peut alors distinguer un *réalisme fort*, en l'occurrence la position adoptée par Einstein, pour lesquels les phénomènes sont décrits en termes d'objets (quantiques ou non) bien définis, individués et séparables ; et un *réalisme faible*, spécifique au monde quantique,⁷⁵ prenant en compte la possibilité d'objets préindividuels ou incomplètement individués⁷⁶, et en particulier l'intrication de certaines propriétés encore indifférenciées entre des objets encore non séparables.⁷⁷

73. Au sens où leur relation de phase est bien définie. En toute rigueur, il conviendrait de distinguer *cohérence spatiale* (longueur de cohérence, sur laquelle on peut considérer que la phase est raisonnablement stable) et *cohérence temporelle* (*idem*, mais sur un temps de cohérence).

74. Gilbert Simondon, *L'Individuation à la lumière des notions de forme et d'information* (1958) ; Paris : éd. Jérôme Millon, 2013. Notons que, dès 1958, Simondon place la question des objets quantiques au cœur de son projet, en s'appuyant en particulier sur les idées de Louis de Broglie. Longtemps méconnue, sa pensée connaît, depuis une dizaine d'années, un net regain d'intérêt parmi les épistémologues.

75. Weaver D.R. Weinbaum, « Spooky action at no distance : On the individuation of quantum systems » (2016). Accessible en ligne : https://www.researchgate.net/publication/301878217_Spooky_Action_at_No_Distance_On_the_individuation_of_quantum_mechanical_systems (mars 2023).

76. Pour Simondon, « *la capacité de relation fait partie de l'être, et entre dans sa définition et dans la détermination de ses limites (...) l'individu est un être qui ne peut exister comme individu qu'en relation avec un réel non individué* » (*L'Individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, *op. cit.*, p. 143). Typiquement, au niveau quantique dans une vision à la de Broglie, c'est l'onde pilote qui est

De nouveau, si la notion d'action à distance garde un sens conforme à l'intuition classique pour les objets dûment individués, son interprétation devient beaucoup plus confuse pour des objets préindividuels. Or la notion d'individuation intègre une part, sinon de subjectivité, du moins de dépendance à l'observateur : tel objet clairement individué pour un observateur disposant des résultats de mesure pertinents pourra encore relever du préindividuel pour un autre ne disposant pas des mêmes informations.

6. La seconde révolution quantique

Compte tenu de la difficulté d'isoler et de manipuler des objets quantiques individuels, ces difficultés interprétatives sont toutefois longtemps restées très académiques, les débats plus concrets se focalisant sur les questions d'ordre statistique liées au passage des propriétés théoriques de ces objets individuels (et *a fortiori* préindividuels) aux phénomènes observés sur de larges collections.

Le progrès des technologies quantiques, et en particulier celui des détecteurs de photons individuels, a toutefois changé la donne à la fin du XX^e siècle et rendu possible l'exploration expérimentale de ces phénomènes. Si c'est d'abord la promesse de nouvelles applications industrielles qui a justifié l'expression de « seconde révolution quantique », ⁷⁸ celle-ci se caractérise également par un changement de point de vue plus subtil ⁷⁹ : dans la mesure où l'on sait désormais identifier des objets quantiques avec une très bonne fiabilité, ⁸⁰ on peut se contenter de suivre individuellement ceux auxquels on s'intéresse, quitte à négliger tous les autres, pourtant incomparablement plus nombreux.

porteuse de ce réel non individué ; mais, pour Simondon, cela vaut aussi bien pour une particule classique en présence d'un champ électromagnétique, par exemple.

77. Éric Picholle, « Un processus d'individuation : le récit quantique », in *Récits et modélisation*, éd. Somnium, coll. Sciences et Fictions à Peyresq, **12**, pp. 367-389 (2020). Accessible en ligne : https://www.researchgate.net/publication/342819996_Un_processus_d'individuation_le_recit_quantique (mars 2023).

78. Jonathan P. Dowling et Gerard. Milburn, « Quantum technology : the second quantum revolution », *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 361, pp. 1655-1674 (2003).

79. Alain Aspect, « From Einstein's doubts to quantum information : the second quantum revolution », keynote conference, *SPIE Photonics Europe*, 2018. Accessible en ligne : https://spie.org/news/epe18_landing/epe18_aspect-?SSO=1 (mars 2023).

80. On dispose ainsi aujourd'hui de détecteurs de photons uniques (*single photon detectors*, SPD) dont l'efficacité est de l'ordre de 80%, avec une résolution temporelle inférieure à 100 ps (un dix-milliardième de seconde).

Photons annoncés

C'est en particulier l'esprit du nouveau champ disciplinaire qu'il est aujourd'hui convenu d'appeler *l'information quantique*. Ainsi, on peut profiter de l'intrication de deux photons (§ 5.1) pour détecter l'un des deux (Fig. 7) et ainsi *annoncer* l'arrivée d'un photon pleinement individué, mais encore « vif » et susceptible d'interagir avec d'autres objets quantiques⁸¹ (*heralded photon*). Il suffit alors de s'assurer de flux lumineux assez faibles pour qu'aucun autre photon ne se présente pendant la (très brève) fenêtre temporelle où son arrivée est annoncée.

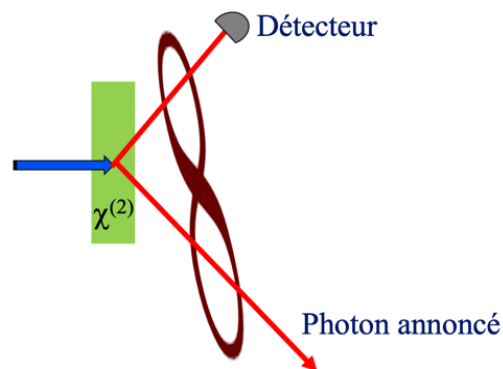


Figure 7 : Schéma de principe de la création d'un photon annoncé (mêmes conventions que pour la Fig. 6).

D'autres techniques relativement aisées à mettre en œuvre permettent également, par exemple, de garantir l'indiscernabilité des photons ou des atomes exploités ou de caractériser la longueur de cohérence des paquets d'ondes.⁸²

Récits quantiques

Un corollaire assez inattendu de la seconde révolution quantique et de l'individuation assez systématique des objets qu'elle manipule est la mutation du lexique, donc du discours sur le monde quantique. Là où, au XX^e siècle, les tenants de l'orthodoxie de Copenhague se méfiaient profondément du langage naturel et n'employaient par exemple la locution « un photon » qu'avec la plus grande prudence, on peut désormais l'employer à la façon des ingénieurs, pragmatique et libre de tout vertige ontologique, sans susciter d'objections de principe. On peut

81. Par opposition à l'ancien dilemme entre photons préindividuels, avant toute interaction avec un détecteur, ou « échus », individué par une mesure destructrice.

82. Respectivement « *HOM dip* » et « effet *HBT* ». Alain Aspect, « Hanbury Brown and Twiss, Hong Ou and Mandel effects and other landmarks in quantum optics : from photons to atoms », in *Current Trends in Atomic Physics*, dir. A. Browaeys, T. Porto, C.S. Adams, M. Weidemüller & L.F. Cugliandolo, Oxford Univ. Press, ch. 12 (2019). Accessible en ligne : <https://arxiv.org/abs/2005.08239> (mars 2023).

même développer des récits à leur propos, c'est-à-dire, au sens de Paul Ricœur,⁸³ conférer par le discours une structure temporelle aux événements quantiques, avec un début, un milieu et une fin.⁷⁵

De façon similaire, quoique moins souvent considérée, c'est aussi la mise en récit qui confère aux mêmes événements une structure spatiale : dire une action d'un objet sur un autre, présumés localisés (le langage naturel se prêtant mal à dire la non localité⁸⁴), c'est déjà choisir un point de départ et un point d'arrivée ; et même envisager un entre-deux... Dès lors, on pourrait envisager de décrire en langage naturel une interaction à distance au niveau quantique.

De ce fait, la sortie des laboratoires des technologies quantiques, caractéristique de la « seconde révolution », ne semble pas devoir se traduire par une remise en question de l'intuition commune de l'action à distance.

7. Et maintenant ?

Les deux révolutions scientifiques majeures de la physique du siècle précédent, la théorie quantique et celles de la relativité einsteinienne, ont puissamment conforté les théories classiques des interactions gravitationnelle et électromagnétique. Elles en ont en effet précisé les limites et montré que celles-ci ne sont jamais même seulement approchées dans la vie courante.

Avec l'ajout des théories des interactions nucléaires faible et forte, elles rendent en effet excellentement compte, et avec une précision précédemment impensable, de la quasi-totalité des actions à distance susceptibles d'intervenir à l'échelle humaine, et même bien au-delà⁸⁵.

La difficulté conceptuelle essentielle de l'action à distance dans un contexte de relativité restreinte einsteinienne, liée à la disparition de la notion de simultanéité, semble pour sa part assez bien prise en compte dans le discours scientifique et philosophique actuel, même si elle reste étrangère au grand public et à l'origine de trop nombreux contresens.

83. Paul Ricœur, *Temps et récit* (1983) ; Paris : Seuil ; coll. Points essais, 1991.

84. A. Danan, D. Farfurnik, S. Bar-Ad, et L. Vaidman, « Asking photons where they have been », *Physical Review Letters*, **111**, 240402, 2013.

85. Des grandeurs atomiques, femtoseconde et femtomètre au siècle et à la centaine d'années-lumière, soit une gamme de confiance sans équivalent de vingt-quatre ordres de grandeur.

Pour autant, si l'esprit même de la seconde révolution quantique consiste, comme j'ai tenté de le montrer, à s'autoriser à dépasser les vertiges ontologiques soulevés par la physique du XX^e siècle, et à s'en donner les moyens technologiques dans certaines situations bien choisies, ce nouveau pragmatisme — qui vient d'être salué par le prix Nobel de physique 2022⁸⁶ — ne vaut aucunement clôture du débat. Hors de ces quelques configurations idéales⁸⁷ exploitées par les spécialistes d'ingénierie et d'information quantiques, l'action à distance reste au début du XXI^e siècle un concept des plus ambigus, dès que l'on prétend dépasser les approximations classiques.

Repenser le concept d'action à distance pour le monde quantique

Du point de vue quantique, une première difficulté conceptuelle dérive de l'hypothèse implicite d'individuation — ou *a minima* de séparabilité — des objets entre lesquels on envisage une action à distance. En effet, dans le cas des phénomènes d'intrication, un corollaire en est la réintroduction du type de « *spooky action at a distance* » qui contrariait tant Einstein.

Il apparaît nécessaire et urgent de réexaminer plus rigoureusement le concept même d'action à distance d'un point de vue ontologique. Son adaptation non seulement à l'action entre objets préindividuels, ou entre objets préindividuels et objets individués, mais surtout aux comportements collectifs anti-intuitifs d'objets partiellement individués mais intriqués, pourrait bien constituer l'un des enjeux scientifiques les plus actuels, à mi-chemin entre physique et philosophie.

Même en se restreignant à des objets présumés individués, une seconde difficulté résulte de la lourdeur même du formalisme quantique, donc de l'incapacité des physiciens à décrire exactement des actions à distance entre des ensembles un tant soit peu complexes d'objets quantiques. Ils ressortissent alors à une forme de bricolage conceptuel⁸⁸ faisant intervenir un bestiaire quantique hétéroclite — photons

86. Alain Aspect s'est vu décerner le Prix Nobel 2022 pour ses travaux fondamentaux sur l'intrication quantique, avec John F. Clauser mais aussi avec Anton Zeilinger, physicien appliqué qui en a développé plusieurs applications directes, cryptographiques en particulier.

87. Quoique, parfois, très quotidiennes, comme dans des applications de sécurisation par QKD des cartes de crédit. Voir par ex. : Richard J. Fitzgerald, « Quantum security for your credit card », *Physics Today*, 22 déc. 2014.

88. Au sens par exemple *La Pensée sauvage* (1962), de Claude Lévi-Strauss (Paris : Plon, 2014). Si l'analyse épistémologique de Lévi-Strauss portait initialement sur le discours des sciences humaines, il est intrigant de constater comment, confrontées à une déstabilisation profonde de leurs paradigmes classiques, les sciences dites "dures" peuvent ressortir à des recettes comparables. Voir par exemple à ce propos : Paul-Antoine Miquel, « Les Bricolages de la Nature », in *Noésis*, 5, pp. 149-174, 2003 ; accessible en ligne : <https://journals.openedition.org/noesis/1511#text> (mars 2023).

virtuels, photons jumeaux, atomes habillés, etc. — dont l'une des caractéristiques communes est sans doute de « sauver » une intuition classique de l'action à distance.

Aux marges de l'univers

On retrouve également une variété d'objets exotiques à très grande échelle, aux limites de notre compréhension du cosmos. Si les théories actuelles de la relativité générale décrivent bien l'action gravitationnelle à distance entre objets cosmiques individuels bien identifiés, elles peinent à rendre compte de certains comportements globaux comme la vitesse d'expansion de l'univers ; les situations de champ gravitationnel très fort (par exemple au cœur d'un « trou noir »⁸⁹), sur lesquelles on ne dispose pas de données d'observation directe, restent en outre très mal connues.

Certains modèles dominants font même appel à une hypothétique « matière noire », voire à une « énergie noire », inobservables,⁹⁰ que l'on aurait peut-être, en d'autres temps, qualifiées d'occultes mais dont ils n'hésitent pas à estimer qu'elles pourraient constituer 95% de notre univers⁹¹.

Vers une théorie complète de l'action à distance ?

La réconciliation entre la relativité générale (i.e. la théorie actuelle de l'action gravitationnelle à distance), intrinsèquement non linéaire, et la théorie quantique des champs (i.e. celle qui décrit les trois autres types d'interaction à distance), au

89. Un « trou noir » est une région de l'espace-temps à la courbure très prononcée (cf. Fig. 3), à tel point que les géodésiques se referment sur elles-mêmes et qu'il devient impossible d'en sortir, même pour la lumière. Si l'idée en remonte à 1916 (Karl Schwarzschild), l'expression de « trou noir » elle-même n'est apparue que dans les années 1960. Le bestiaire relativiste est riche de bien d'autres objets singuliers, comme les « fontaines blanches » (des singularités topologiques où la flèche du temps serait inversée, et dont la lumière ne pourrait que sortir, à l'inverse des trous noirs), les « trous de ver », etc.

90. La plupart des modèles cosmologiques s'avérant incapables de décrire la formation de l'univers tel que nous l'observons à partir d'un événement singulier de type « Big Bang » sur la seule base de l'action à distance mutuelle entre des objets dont nous connaissons l'existence, une réponse consiste à postuler, d'une part, l'existence d'une « énergie noire » responsable de l'accélération de l'expansion de l'univers (*via* une « constante cosmologique ») ; et d'autre part de « matière noire » non encore détectée. Des approches alternatives (comme celle de la « Dynamique newtonienne modifiée ») consistent à envisager que la forme des interactions à distance, et en particulier celle de la gravitation, pourrait changer à très grande échelle.

91. Si l'on estime avec la majorité des astrophysiciens que l'énergie noire devrait représenter environ 68% de l'énergie totale de l'univers, et la matière noire 27%, la part de la matière et de l'énergie actuellement identifiée serait seulement de l'ordre de 5%.

formalisme essentiellement linéaire, reste en revanche un problème ouvert, et sans doute le principal défi de la physique actuelle.

Paradoxalement peut-être pour des humains habitués à vivre dans un monde apparemment dominé par la gravité, l'interaction gravitationnelle est en effet considérablement plus faible que les autres types d'interaction à distance, et les diverses approches proposées pour le développement d'une *gravitation quantique* se heurtent au fait que, en laboratoire comme au cœur d'un trou noir, ses effets proprement quantiques ne se manifesteraient possiblement que pour des distances extraordinairement faibles, de l'ordre de la longueur de Planck⁹².

Pour fascinantes qu'elles soient, les diverses théories (*supercordes, gravitons, etc.*) développées à cet effet restent largement spéculatives. C'est également le cas des théories qui tentent, par exemple, d'interpréter certaines propriétés quantiques fondamentales en termes d'action à distance de l'environnement d'un objet quantique sur sa fonction d'onde.⁹³

Quoi qu'il en soit, il semble désormais bien établi, pour paraphraser le grand théoricien de l'action quantique à distance en exergue de cet article, que les anges censés pousser les planètes sur leur orbite n'ont pas d'ailes ; à cela près, nos théories actuelles sont assez similaires aux théories médiévales...

Je remercie Virginia D'Auria pour sa relecture critique de cet article.

Environ 87 600 signes

92. Soit de l'ordre de 10^{-35} m, ou de quelques milliardièmes de milliardième de milliardième de nanomètres...

93. e.g. Franck Laloë, « A model of quantum collapse induced by gravity », *European Physical Journal D*, **4**, 25, 2020.