



HAL
open science

Un processus d'individuation : le récit quantique

Éric Picholle

► **To cite this version:**

Éric Picholle. Un processus d'individuation : le récit quantique. Récits et modélisation, 12, Editions du Somnium, pp.367-389, 2020, Sciences et fiction à Peyresq, 978-2-918696-01-8. hal-03567597

HAL Id: hal-03567597

<https://hal.science/hal-03567597>

Submitted on 22 Feb 2022

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

Un processus d'individuation : le récit quantique

Éric Picholle

1. Introduction

La problématique du discours sur le monde quantique est aussi ancienne que la mécanique quantique elle-même. Dans quelle mesure, et dans quelles limites, le langage naturel est-il adapté pour le décrire ? « *Ne vous exprimez jamais plus clairement que vous ne pensez* », prônait Niels Bohr à Copenhague.^{1,2} Résultat : jusque dans les années 1980, la posture ultra-majoritaire chez les physiciens a été de ne reconnaître comme légitime pour décrire et modéliser le monde quantique que le seul langage formel, mathématique.

Cette question du formalisme et de la légitimité du langage naturel a été au cœur de la philosophie de la physique du xx^e siècle³ – avec le résultat assez inattendu que ces réflexions ont pu contribuer à faire émerger la linguistique moderne, avec par exemple les travaux du Cercle de Vienne, mais n'ont rien apporté de bien constructif ni à l'épistémologie, ni à la physique.

-
1. Cité par Abraham PAIS, « Einstein and the quantum theory », *Review of Modern Physics*, vol. 51, 4, 853-913, 1979, p. 890.
 2. Pour une analyse plus détaillée du problème du langage chez Bohr, voir par exemple Sébastien POINAT, *Mécanique quantique. Du formalisme mathématique au concept philosophique*, Paris, Hermann, 2014, pp. 76-105.
 3. 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, 1998, pp. 193-214.

De son côté, dans la seconde moitié du siècle, l'épistémologue Gilbert Simondon a tenté de fonder sur la notion d'*individuation*, qu'il emprunte en partie à Martin Heidegger,⁴ une ontologie, ou plutôt une ontogénèse, adaptée au monde quantique.⁵ Pour lui, en effet, «*la nécessité de corriger et de coupler les concepts de base en physique traduit peut-être le fait que les concepts sont adéquats à la réalité individuée seulement, et non à la réalité préindividuelle*»^{5a} (ces concepts seront explicités dans la suite de l'article). Ainsi, les deux théories concurrentes lorsqu'il compose *L'Individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, à savoir la théorie quantique des champs (dans son interprétation orthodoxe dite de Copenhague) et la mécanique ondulatoire de Louis de Broglie, pourraient selon le philosophe «*être envisagées comme deux manières d'exprimer le préindividuel à travers les différentes manifestations où il intervient comme préindividuel*»^{5a}.

Les exemples d'individuation physique qu'analyse concrètement Simondon restent toutefois soit essentiellement *classiques* (au sens de «non quantiques»), comme les problèmes de transition de phase dans les cristaux,^{5b} soit probabilistes, dans une approche cousine de l'interprétation dite de Copenhague,⁶ dominante depuis le congrès Solvay de 1927. Même si l'on peut en principe appliquer cette approche pour interpréter des mesures individuelles, elle ne trouve vraiment son sens et sa pertinence que lorsque l'on considère un nombre suffisant de mesures pour que les régularités statistiques émergent.

-
4. Notons que si HEIDEGGER semble avoir été tout à fait conscient de la révolution quantique en cours au moment même où il écrit *Être et temps* (*Sein und Zeit*, 1927 ; Paris, NRF-Gallimard, 1992), son approche de celle-ci est, peut-être paradoxalement, d'ordre plus épistémologique qu'ontologique, avec une réflexion sur la mathématisation de la physique et sur la possibilité de la connaître : après Heisenberg, ce que nous connaissons des choses, c'est ce qu'elles sont pour nous (*Gegenstand*), non ce qu'elles sont en soi (*Dinge an sich*). Voir par exemple : Paul-Antoine MIQUEL, « Heidegger et la physique », *Noésis*, 9, *Heidegger et les sciences*, 2006, pp. 103-117. Accessible en ligne : <https://journals.openedition.org/noesis/279> (juin 2020).
 5. Gilbert SIMONDON, *L'Individuation à la lumière des notions de forme et d'information* (1958) ; Paris, Jérôme Million éd., 2013. (a) p. 27 (c'est GS qui souligne) ; (b) p. 40.
 6. Vincent BONTEMS et Christian DE RONDE ont approfondi cette analogie entre les concepts de la physique des transitions de phase et ceux de la mécanique quantique : « Simondon, l'hypothèse du préindividuel et la mécanique quantique. Une interprétation réaliste non substantialiste du formalisme quantique », in *Gilbert Simondon ou l'invention du futur*, actes du Colloque de Cerisy (août 2013), dir. Vincent BONTEMS, Klincksieck éd., pp. 183-201.

Or la manipulation d'objets quantiques individuels est aujourd'hui devenue un enjeu majeur, non seulement de la physique, mais même d'authentiques technologies quantiques hier encore réputées inaccessibles. En effet, au cours des dernières décennies, « *il est devenu possible de suivre l'évolution en temps réel d'un atome unique. De nombreuses expériences, considérées comme des « expériences de pensée » par les pères fondateurs de la mécanique quantique, sont devenues réalisables [...] et [il paraît] crucial de ménager des temps de réflexion où l'on essaie de prendre du recul et de se poser des questions sur la signification profonde des concepts que l'on utilise* »⁷ – et d'abord, bien sûr, des mots pour les dire.

L'objet de cet article est, d'une part, de reconsidérer la notion simondonienne d'individuation à la lumière de certaines de ces évolutions récentes, de l'optique quantique en particulier,⁸ et plus spécifiquement en considérant la notion de photon annoncé (*heralded photon*), introduite en 1986 seulement par Alain Aspect⁹ ; et d'autre part de proposer une approche alternative de la question du discours sur le monde quantique, sous l'angle du récit et de la modélisation – dans l'esprit, nous l'espérons, de Simondon lui-même, pour lequel « *précisément, dans l'opération technique, c'est la médiation elle-même qu'il faut considérer* »^{5b}.



Gilbert Simondon

7. Claude COHEN-TANNOUJJI, Préface à *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique*, de Franck Laloë, Les Ulis, EDP Sciences, 2011, pp. xi-xii.
8. Qui se trouve être la spécialité de l'auteur du présent article. On pourrait bien sûr développer des raisonnements très similaires pour la physique atomique, autour d'expériences avec des atomes uniques.
9. Philippe GRANGIER, Gérard ROGER & Alain ASPECT, « Experimental evidence for a photon anticorrelation effect on a beam-splitter: a new light on single-photon interferences », *Europhysics Letters*, 1, 1986, p. 173.

2. Le discours quantique formel : une méta-métaphysique ?

La position ultra-formaliste de Bohr reposait sur deux difficultés classiques lorsque l'on cherche à décrire le monde quantique en langage naturel, et identifiées dès l'élaboration de la théorie quantique en 1927 :

1/ Les restrictions liées à la théorie de la mesure (relations de conjugaison de Heisenberg) : on ne peut pas affirmer, même implicitement, ce que l'on ne sait pas. Et l'on ne sait pas forcément grand-chose, ce qui n'est pas toujours facile à dire en langage naturel sans multiplier les précautions oratoires rapidement intenables...

La relation de conjugaison entre l'énergie et le temps, par exemple, $\Delta E \Delta t \geq h/2\pi$, peut sembler induire une difficulté grammaticale en langage naturel : exprimer une proposition au présent de l'indicatif, n'est-ce pas déjà imposer une contrainte implicite, présumer une mesure temporelle qui empêcherait de connaître très précisément l'énergie de l'objet considéré ? De même la relation de conjugaison entre le nombre de photons portés par une onde et la phase de celle-ci, $\Delta n \Delta \varphi \geq 2\pi$,¹⁰ peut sembler interdire de contrôler précisément la phase et l'intensité d'une onde – donc de développer un bon laser.¹¹

2/ Mais ce qui perturbait vraiment Bohr et Einstein, c'était plutôt ce que l'on appelle maintenant la *non séparabilité* et l'*intrication quantique*.¹²

10. Louis DE BROGLIE, « La Relation d'incertitude $\delta n \cdot \delta \varphi \geq 2\pi$ » (1965) ; in *Certitudes et incertitudes de la science*, Albin Michel, Paris, 1966, p. 102.

11. L'inventeur du maser et du laser, Charles H. TOWNES, raconte que des esprits aussi éclairés que Niels Bohr ou John von Neumann avaient de ce fait eu quelque difficulté à accepter la possibilité même de tels dispositifs, alors qu'il leur en apportait la démonstration expérimentale. *How The Laser Happened*, Oxford Univ. Press, New York, 1999, pp. 69-71. La difficulté était que ces quanticiens raisonnaient *a priori* en termes de petits nombres de photons, ($\Delta n \sim 1$), situation dans laquelle la relation de Heisenberg est violemment contraignante, alors que le lasériste travaillait avec des faisceaux intenses ($\Delta n \gg 1$), donc « classiques » au sens où cette relation de conjugaison est alors toujours vérifiée en pratique.

12. « *Caractéristique principale de la mécanique quantique* » selon Erwin SCHRÖDINGER (« Discussion of probability relations between separated systems », *Proc. Cambridge Phil. Soc.*, **31**, 1935, p. 555), l'intrication est la propriété, pour un système, de ne pouvoir être *séparé* en sous-systèmes distinct, du fait de corrélations fortes entre certaines propriétés physiques de ces sous-systèmes. Ainsi, si la mesure d'une propriété donnée sur des sous-systèmes *a* et *b* peut produire soit la valeur 0, soit la valeur 1, *a* et *b* ne sont pas séparables dans l'état : $|a=0, b=0\rangle + |a=1, b=1\rangle$, puisque la mesure produira le même résultat, encore indéterminé, pour les deux, quel que soit celle que l'on réalise en premier.

Du fait de leur caractère ondulatoire, les objets quantiques ont une extension spatiale finie. Lorsque celle-ci est très petite, on peut, en ce sens, leur affecter une position. Lorsque ce n'est plus le cas (par exemple lorsque la « fonction d'onde » de l'objet est susceptible de recouvrir deux instruments de mesure distincts), il devient nécessaire de prendre en compte sa « *non localité* ». De même si, en physique classique, il est en général possible de distinguer deux objets, ne serait-ce que par leurs positions respectives, ce n'est pas toujours le cas en physique quantique. On parle alors d'objets *indiscernables*, avec des conséquences peu intuitives sur les statistiques qui les gouvernent. Notons que celles-ci sont quotidiennement mises en évidence dans des expériences relativement simples, comme l'observation d'interférences de type Hong-Ou-Mandel (« *HOM-dip* »). Enfin, les propriétés quantiques de deux objets « intriqués » peuvent être strictement corrélées, même à très grande distance, excluant toute communication entre eux : on parle alors d'objets « *non séparables* ».

Pour dire avec quelque généralité le monde quantique en langage naturel, il fallait donc soit s'autoriser à inventer des néologismes pour désigner des objets nouveaux, non intuitifs (mais est-on encore dans le langage naturel ?) et (souvent implicitement) leurs propriétés ontologiques, soit s'encombrer de périphrases pour préciser à chaque pas ses principes paradigmatiques.

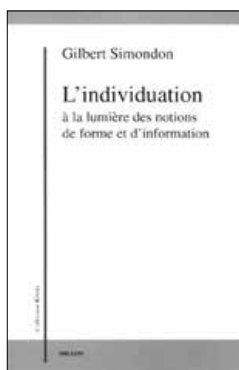
Or les polémiques portant justement sur ces principes (ou donc plutôt ces hypothèses) d'ordre métaphysique, non sur la physique proprement dite – sur laquelle un consensus très large est établi depuis 1927 – leur explicitation risquait à chaque instant de rallumer des polémiques stériles, entre connaisseurs, ou de susciter toutes sortes de malentendus dans un public élargi : que l'on pense par exemple aux mille et une interprétations fantaisistes ou fantasmées du pseudo-paradoxe du « chat de Schrödinger »¹³.



13. Jean-Marc LÉVY-LEBLOND, « Le Mistigri de Schrödinger », in *Sciences et Avenir* hors-série n° 148, « Le paradoxe du chat de Schrödinger », oct.-nov. 2006.

Le recours au formalisme, également parfaitement consensuel, permettait donc de court-circuiter cette difficulté et de produire un discours transversal, recevable dans toutes les interprétations – y compris celles que l'on pourrait vouloir construire en termes soit d'*individuation*, comme l'ont montré Vincent Bontems et Christian de Ronde,⁶ soit d'émergence de propriétés macroscopiques, comme l'envisage Michel Bitbol^{14,15} – et donc au-delà de la métaphysique, dans la mesure où un tel recours dispense de se situer par rapport aux enjeux paradigmatiques.

Une telle méta-métaphysique¹⁶ a largement fait ses preuves, dans la mesure où la posture formaliste, ultra-majoritaire chez les quanticiens des origines à la fin du xx^e siècle, a également su s'adapter aux évolutions théoriques, expérimentales et interprétatives de la physique quantique depuis les années 1980. Elle ne se distingue d'ailleurs que par le discours de la posture professionnelle a-métaphysique de la plupart des praticiens de la physique quantique, qui tendent à distinguer soigneusement spéculations ludiques et propositions physiques. Du point de vue métaphysique *stricto sensu*, en revanche, elle a tout du faux-fuyant, occultant les questions proprement ontologiques (ou « quasi-ontologiques »³), essentiellement inchangées depuis 1927.



-
14. Michel BITBOL, « Ontology, matter and emergence », *Phenom. Cogn. Sci.* 6, 2007, pp.293-307.
 15. Sébastien POINAT, *Mécanique quantique*, op. cit. L'auteur conclut que « l'émergentisme quantique a tort de faire dire à la mécanique quantique ce qu'elle ne peut pas dire, et de ne pas s'en tenir au seul langage qui lui convienne. » (p.31)
 16. Au sens où cette posture vient *après* les débats métaphysiques qui eux-mêmes suivaient la révolution physique. Mais on pourrait aussi bien parler d'une « antimétaphysique », au sens d'Ernst Mach qui, bien avant Heisenberg, ramène la connaissance de la réalité physique à celle des résultats de mesure, voire des sensations induites, comme la vision de la position d'une aiguille sur un vernier. (Ernst MACH, « Remarques préliminaires antimétaphysiques », in *L'Analyse des sensations (Die Analyse der Empfindungen und das Verhältnis des Physischen zum Psychischen*, 1886) ; Paris, Jacqueline Chambon éd., coll. Rayon Philo, 1998).

Modéliser les objets quantiques

Des hypothèses classiques sous-jacentes à l'idée que l'on mesure toujours *quelque chose* sont d'une part celles que cette chose a une existence objective, indépendante de l'observateur ; et d'autre part que ses caractéristiques sont, au moins en droit, connaissables avec toute la précision requise pour valider ou non le modèle.

Ces hypothèses ont été remises en cause par la révolution quantique du début du xx^e siècle. Si celle-ci donne encore aujourd'hui lieu à des interprétations d'ordre ontologique très variées, un consensus durable s'était très vite établi autour, d'une part, d'une théorie de la mesure très prudente (à l'échelle microphysique, et parfois bien au-delà, « *la mesure perturbe* » et « *on n'a rien pour rien...* »), et d'autre part d'un formalisme permettant de décrire le monde de la microphysique exclusivement en termes d'observables et de résultats de mesure, la définition d'un objet quantique donné pouvant de ce fait s'avérer très différente selon l'observateur, l'instrumentation à laquelle il a accès et les mesures qu'il a effectivement réalisées.

Les définitions classiques d'un objet, ainsi que les tentatives de clôture d'un système, peuvent alors apparaître assez naïves, sinon vaines, les objets quantiques pouvant se révéler non-locaux, non-discernables, voire non-séparables... La réponse « orthodoxe » à ces difficultés, dans la logique de « l'interprétation de Copenhague », fut longtemps le rejet systématique de toute approche physicaliste du monde quantique, au profit exclusif de l'approche formaliste. Celle-ci a sans conteste abouti à quelques-uns des triomphes les plus spectaculaires de la modélisation physique, certaines prédictions quantitatives s'avérant conformes aux valeurs mesurées jusqu'à pas moins de quatorze chiffres significatifs,¹ mais aussi à un découplage entre la communauté des quanticiens et celle de la physique appliquée.

Simulations quantiques

Ces modèles formels s'avèrent en outre extrêmement lourds, le nombre de calculs croissant extrêmement vite avec le nombre de particules considéré,^{2a} ce qui, même avec les ordinateurs les plus puissants du moment, limite concrètement leur emploi à des systèmes composé d'un petit nombre d'objets.

Paradoxalement, on assiste donc aujourd'hui à la montée en puissance de ce qu'il est convenu d'appeler la *simulation quantique*,³ c'est à dire de modèles *analogiques*, dans lesquels un ensemble très bien contrôlé d'objets quantiques (typiquement, quelques millions ou milliards d'atomes ou quelques dizaines de photons) dont les interactions sont décrites par les mêmes équations (ou des équations analogues) que celles gouvernant le système physique à modéliser est utilisé pour simuler le comportement de celui-ci.^{2b}

1. En l'occurrence, celle du moment magnétique anormal de l'électron, selon des modèles basés sur l'électrodynamique quantique (QED).
2. (a) Typiquement, pour un système quantique de N particules à deux niveaux (les plus simples possible), le nombre d'états à considérer – et donc de calculs à réaliser – varie comme 2^N .
(b) La puissance (encore largement potentielle...) des simulateurs quantiques dérive du fait que, si l'on n'impose pas l'état du système, celui-ci se retrouve lui-même, sous les mêmes hypothèses, dans une superposition de 2^N états. Certaines équipes revendiquent aujourd'hui, quoique sans doute de façon encore un peu optimiste, la réalisation de simulateurs quantiques avec $N \sim 50$ (soit de l'ordre d'un million de milliards d'états). Des arguments similaires sont avancés en faveur des technologies connexes visant à développer un « ordinateur quantique ».
3. Voir par exemple : Michèle LEDUC & Sébastien TANZILLI, « Avec la physique quantique, des technologies nouvelles pour le futur », in *Reflets de la physique*, 51, déc. 2016, pp.28-33. Accessible en ligne : <https://www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/pdf/2016/04/refdp201651p28.pdf> (juin 2020).

3. Préindividuel *vs.* collectif quantique

La notion simondonienne d'individuation – et celle, complémentaire, de *préindividuel* – apporte-t-elle un point de vue nouveau et éclairant sur la réalité des objets quantiques ?

Pour sa part, Gilbert Simondon étudie prioritairement l'individuation physique comme un phénomène sinon macroscopique, du moins essentiellement classique, au sens où il implique un très grand nombre d'objets élémentaires (en ce sens, un laser, objet technique quantique par excellence,^{17,18} peut être considéré comme classique, tant que l'on ne va pas explorer le détail des corrélations entre les photons qu'il émet). Il est toutefois bien conscient qu'une approche statistique, voire thermodynamique, « *n'épuise pas la réalité de l'individuation physique* »^{19a} – le hasard lui-même pouvant apparaître comme un opérateur local du processus d'individuation²⁰.

Selon Bontems et de Ronde, le concept d'individuation n'en vise pas moins « *à étendre la désubstantialisation à toute la physique [et] consiste dans l'abandon du postulat de l'analyse cartésienne selon lequel toute réalité physique est réductible à un système d'entités* »²¹. La notion substantialiste d'entité constitue pour eux un obstacle épistémologique majeur, au sens de Bachelard, à la compréhension de la mécanique quantique,²² et en particulier de la notion d'intrication.

Certains physiciens, comme Gilles Cohen-Tannoudji, n'hésitent pas à identifier le préindividuel à « *l'état réel du système* »²³ et inscrivent

17. Louis DE BROGLIE, « Les Lasers et leur importance théorique », in *Certitudes et incertitudes de la science*, Paris, Albin Michel, 1966, p. 102.

18. Éric PICHOLLE, « Le Laser ou l'impensable ingénierie quantique », *Noésis*, 5, *Formes et crises de la rationalité au XX^e siècle*, vol. 2, dir. Jean-Luc Gautero & Paul-Antoine Miquel, 2003, pp. 101-115. Accessible en ligne : <https://journals.openedition.org/noesis/1507> (juin 2020).

19. Gilbert SIMONDON, *L'Individuation à la lumière des notions de forme et d'information* (1958), *op. cit.* (a) p. 26 ; (b) p. 136 ; (c) p. 158.

20. Baptiste MORIZOT, *Pour une théorie de la rencontre. Hasard et individuation chez Gilbert Simondon*, Paris, Vrin, 2016.

21. Vincent BONTEMS & Christian DE RONDE, « Simondon, l'hypothèse du préindividuel et la mécanique quantique », in *Gilbert Simondon ou l'invention du futur*, *op. cit.*, p. 193. Ce sont les auteurs, VB & CdR, qui soulignent.

22. Christian DE RONDE & Vincent BONTEMS, « La Notion d'entité en tant qu'obstacle épistémologique. Bachelard, la mécanique quantique et la logique », in *Bulletin des amis de Gaston Bachelard*, 2011, p. 12.

23. Gilles COHEN-TANNOUDJI, « Physique des particules et individuation selon Simondon », in *Gilbert Simondon ou l'invention du futur*, *op. cit.*, pp. 203-208.

leur lecture de Simondon dans le cadre du débat classique entre Einstein et Bohr sur la complétude ou non de la mécanique quantique. Matteo Smerlak reconsidère pour sa part l'individuation simondonienne non seulement à la lumière de la renormalisation perturbative,^{24a} mais également à celle d'un mécanisme d'échelle cosmique, l'évaporation des trous noirs.²⁴

Simondon et de Broglie

Simondon lui-même évoque le cas des corpuscules élémentaires, matériels ou non, comme le photon. Sa vision du monde quantique est explicitement informée par l'interprétation (alors déjà très minoritaire) de Louis de Broglie, dont il cite des extraits de *Ondes, corpuscules, mécanique ondulatoire*,²⁵ comme^{19b} :

Louis de Broglie [...] oppose deux conceptions du corpuscule. La première est celle qui fait du corpuscule « *un petit objet bien localisé qui décrit dans l'espace au cours du temps une trajectoire sensiblement linéaire sur laquelle il occupe à chaque instant une position bien définie et est animé d'une vitesse bien déterminée* ». Mais il existe une seconde conception selon laquelle on peut dire « *qu'un corpuscule est une unité physique caractérisée par certaines constantes (masse, charge, etc.) et susceptible de produire des effets localisés où il intervient totalement et jamais par fraction, comme par exemple le photon dans l'effet photoélectrique ou l'effet Compton.* »^{25a} Or selon Louis de Broglie, la seconde définition est une conséquence de la première, mais l'inverse n'est pas vrai.

C'est encore *via* Louis de Broglie qu'Andrea Bardin²⁶ établit un lien entre, d'une part, le « *point de vue que Simondon refuse d'appeler «matérialiste»* » mais dont il admet qu'il « *suppose un enchaînement depuis la réalité physique jusqu'aux formes biologiques supérieures, sans établir des*

« Je note qu'une [...] interprétation en termes d'individuation de la théorie quantique des champs permet aussi de lever le paradoxe EPR : la description par la TQC du préindividuel, l'état réel du système, est complète ; comme théorie des champs elle satisfait le principe des actions par contiguïté ; « l'intrication » entre les particules des deux branches de l'expérience EPR se traduit par des corrélations statistiques entre les tribus d'événements d'individuation enregistrés dans les deux branches. » (p.207).

24. Matteo SMERLAK, « Individuation et transduction dans le vide quantique (Feynman, Hawking et Simondon) », *idem*, pp.209-215. (a) Donc également de la théorie quantique des champs.
25. LOUIS DE BROGLIE, *Ondes, corpuscules, mécanique ondulatoire*, Paris, Albin Michel, 1945. (a) p.73.
26. Andrea BARDIN, « De l'homme à la matière : pour une « ontologie difficile ». Marx avec Simondon », *Cahiers Simondon*, 5, dir. J.-H. Barthélémy, Paris, L'Harmattan, 2013, pp.25-43, p.41.

distinctions de classe et de genre [mais avec une] discontinuité qui paraît pouvoir être rapportée au caractère quantique qui apparaît en physique »^{19c} et, d'autre part, une note de Bergson selon laquelle c'est dans la seule perception « macroscopique » des êtres vivants que « règne le déterminisme apparent qui rend possible leur action sur les choses. »²⁷

À l'époque où écrivent de Broglie et Simondon, la technologie des détecteurs est loin de permettre l'expérimentation directe sur des photons uniques,²⁸ sinon en les visualisant sur une plaque photographique²⁹ – c'est à dire en les annihilant.

Trois premiers types d'objets quantiques

On peut déjà distinguer ici trois types d'individuation :

- Une individuation par une mesure non destructive ;
- Une individuation par une mesure destructive, dans le cas du photon ;
- Une individuation macroscopique, associée chez de Broglie à la notion d'« onde », ou à celle de « faisceau » (laser par exemple) dans une vision plus géométrique.

Dans les trois cas, l'objet quantique présente à la fois une « non identité par rapport à lui-même »,^{30a} c'est à dire qu'il est susceptible d'être modifié par les « contraintes topologiques »^{30b} qui lui sont imposées, en l'occurrence l'appareillage de mesure ; et un *devenir*, « relation constitutive de l'être en tant qu'individu »,^{30c} dans la mesure où il est susceptible de modifier son environnement par couplage avec l'observateur, lui-même susceptible d'exploiter de différentes façons l'information acquise lors de la mesure. Dans le lexique de Paul-Antoine Miquel, et

27. Henri BERGSON, *La Pensée et le mouvant* (1934) ; Paris, P.U.F., 2013, p. 61.

28. La question est néanmoins clairement posée quelques lignes plus loin par le physicien – mais, curieusement, le philosophe n'étend pas sa citation jusque là : « Si nous ne gardons dans la définition du corpuscule que l'idée d'une unité physique susceptible de produire des effets localisés, nous pouvons parvenir plus aisément à associer à cette idée celle d'onde : la liaison s'opère en faisant intervenir les probabilités. [...] S'il existe des photons, il faudra que l'intensité de l'onde associée aux photons mesure le nombre de photons par unité de volume. Mais nous pouvons n'avoir dans un train d'ondes qu'un seul photon : que représentera alors l'intensité de l'onde ? » LOUIS DE BROGLIE, *Ondes, corpuscules, mécanique ondulatoire*, op. cit., p. 75.

29. Voir par exemple : Pierre-Michel DUFFIEUX, « La Part que j'ai prise à l'optique nouvelle », *Annales Scient. Univ. Besançon*, 3^e série, fasc. 22, 1974, p. 11. Voir aussi « Le Statistique et l'Individuel », *idem*, fasc. 22, 1974 & « Essai sur le photon », *idem*, fasc. 21, 1972.

30. Gilbert SIMONDON, *L'Individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, op. cit. (a) p. 32 ; (b) p. 227 ; (c) p. 93.

par analogie avec la question de l'individuation en biologie,³¹ on peut respectivement appeler *R1* et *R2* ces deux relations de type *intérieur/extérieur* (le système étant ouvert par la mesure) et *avant/après*.

Le premier type d'individuation a longtemps principalement impliqué les objets quantiques massifs, comme les atomes. Le débat sur leur existence physique, que l'on peut faire remonter jusqu'à la polémique sur la théorie cinétique des gaz de Boltzmann, était déjà essentiellement réglé à l'époque où écrivait Gilbert Simondon et, pour le physicien, « *la question est moins « comment un objet devient-il quantique ? » que « comment reste-t-il quantique ? »* »³² – en l'occurrence, comment un système atomique conserve ses propriétés de cohérence³³.

Dans un souci de simplicité, nous nous limiterons toutefois dans cet article au cas de la lumière, pour lequel les deux derniers types d'individuation³⁴ suggèrent à leur tour de distinguer trois types d'objets quantiques :

- Le photon abstrait, « préindividuel » au sens de Simondon, non encore impliqué dans une mesure et dont on ne peut donc connaître que des propriétés statistiques ;
- Le photon individuel « échu », connu par les résultats des mesures destructives que l'on a effectivement opérées sur lui (elles-mêmes subordonnées aux contraintes de Heisenberg) ;
- La collection macroscopique de photons ayant toutefois conservé des caractéristiques quantiques (les photons élémentaires restant au stade préindividuel, mais le faisceau pouvant être globalement individué).

31. Paul-Antoine MIQUEL & Su-Young HWANG, « From physical to biological individuation », *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 122 (1), 2016, pp.51-57.

32. Daniel HENNEQUIN, « Jouer avec la mécanique quantique. Raconter la mécanique quantique », in *Greg Egan ou la littérature au risque de la science*, actes des IX^e Journées Interdisciplinaires Sciences & Fictions de Peyresq, dir. E. Blanquet, U. Bellagamba, É. Picholle & D. Tron, Nice, Somnium, à paraître en 2021.

33. On sait par exemple réaliser aujourd'hui des condensats de Bose-Einstein incluant des millions d'atomes indiscernables et cohérents entre eux et d'une taille de l'ordre du centimètre. La question de l'individuation d'un tel objet quantique mésoscopique dépasse toutefois le cadre de ce court article.

34. Il existe également des techniques de mesure optique non destructives (ou QND, pour *quantum non demolition*). Voir par exemple : Philippe GRANGIER, Jean-Philippe POIZAT & Jean-François ROCH, « Mesures quantiques non destructives en optique », *Images de la physique* 1999, pp. 15-21. Accessible en ligne : <http://www.cnrs.fr/publications/imagesdelaphysique/couv-PDF/imagephys99/07-iota.pdf> (juin 2020).

Notons qu'il s'agit ici, *a priori*, d'une distinction relative à notre connaissance de ces objets, *via* un couplage avec leur environnement, en l'occurrence des appareils de mesure.

La dernière catégorie (qui rejoint celle des collections d'atomes présentant des propriétés de cohérence) peut apparaître comme la plus intéressante en optique ; en effet, par construction, les photons échus ont quant à eux été annihilés (et le discours *a posteriori* sur les mesures auxquelles il a donné lieu ne pose pas de problème théorique particulier, le photon échu pouvant sans difficulté être séparé de son environnement, et de l'observateur) et les photons préindividuels restent largement inaccessibles à un discours autre que le formalisme quantique.

4. Annonce quantique et individuation

Il convient toutefois, pour être logiquement complet, d'y ajouter une quatrième catégorie d'objets quantiques :

- Le photon individuel « vif », ayant été impliqué dans une ou plusieurs mesure(s) non destructive(s) ayant permis de l'identifier, ainsi que certaines de ses propriétés, et encore susceptible d'interagir avec d'autres objets quantiques.

La possibilité d'observer de tels objets quantiques individuels vifs (correspondant au premier cas d'individuation, par mesure non destructive) est longtemps restée non seulement techniquement inenvisageable, mais contestée dans son principe même.^{35,36}

Or cette possibilité est désormais réalisée quotidiennement dans les laboratoires, et même dans des prototypes industriels de plus en plus nombreux.³⁷ Elle constitue même l'un des éléments-clé de la « seconde révolution quantique » en cours, comme aime à l'appeler Alain Aspect.³⁸

35. Bernard DIU, *Les Atomes existent-ils vraiment*, Paris, Odile Jacob, 1997.

36. Gérard KLEIN & Jean-Pierre PHARABOD, *Heurs et malheurs de la mécanique quantique. Des vérités incroyables*, Paris, Odile Jacob, coll. Sciences, 2017.

37. Ainsi, à Nice, on est aujourd'hui capable de mettre en batterie des composants intégrés produisant typiquement dix millions de photons annoncés vifs par seconde et par canal (10 Mbit/s sur 8 canaux, et potentiellement sur 50). Par exemple : Lufti A. NGAH, Bruno FEDRICI, Laurent LABONTÉ, Virginia D'AURIA & Sébastien TANZILLI, « Ultra-fast heralded single photon source for quantum relay operation », *Laser & Photonics Review*, 9, 11-15, 2015.

38. Alain ASPECT, « From Einstein's doubts to quantum information : the second quantum revolution », keynote conference, *SPIE Photonics Europe*, avril 2018. Accessible en ligne : https://spie.org/news/ep18_landing/ep18_aspect-?SSO=1 (juin 2020).



L'exemple le plus limpide est peut-être celui des « photons annoncés » (*heralded photons*) : un processus non linéaire bien maîtrisé permet de créer des paires de photons intriqués³⁹ « en temps », puisqu'ils sont produits ensemble au cours du même processus. Si alors on détecte l'un des éléments de cette paire (« *idler* »), en prenant soin d'enregistrer l'instant auquel se produit cet événement, on peut alors *prédire* avec certitude (dans la limite de la précision de la mesure⁴⁰) l'instant auquel l'autre élément (« *signal* »), ainsi « annoncé », sera susceptible de parvenir sur un autre détecteur ou d'interagir avec un autre objet quantique.



Alain Aspect
en 2013

-
39. Plutôt que « jumeaux », terme souvent vecteur de confusion. Les photons intriqués peuvent être tout à fait discernables, avoir des fréquences distinctes et se propager dans des directions différentes, etc.
40. Typiquement moins de 100 ps avec les chaînes de détection actuelle, soit une résolution spatiale de l'ordre de 3 cm à la vitesse de la lumière. L'efficacité des compteurs de photons est quant à elle, aujourd'hui, de l'ordre de 80 %.

Le discours quantique à propos de tels photons vifs ne se limite alors plus nécessairement à des généralités plus ou moins statistiques sur de vastes populations, mais peut porter sur des objets quantiques individuels, même si ce concept reste à préciser. Ainsi, *après* la détection du photon annonciateur, on peut souvent reconstruire une suite « classique » d'événements concernant le photon annoncé, même sans avoir effectivement refait pour lui chacune des mesures correspondantes : il a été émis à tel instant, dans tel composant, a été injecté dans telle fibre optique, dont il sortira à tel autre instant, etc. Il est même possible de suivre les déphasages qu'il a subis, et subira, au fil ce parcours, et le cas échéant de prédire le résultat de son interférence future avec d'autres photons individués.⁴¹

Conformément à l'intuition de Simondon, la mesure quantique apparaît bien ici comme un processus d'individuation.⁴² Mais là où, dans le cas d'un photon échu, le couplage avec l'environnement *via* sa détection et en général son annihilation est *a priori* minimal,^{43a} il s'agit plutôt, dans le cas de la mesure annonciatrice, d'une double individuation, incluant celle simultanée d'un *autre* objet^{43b} que celui sur lequel porte la mesure, le photon annoncé, encore susceptible de modifier cet environnement dans le futur.

Un bénéfice de l'exemple du photon annoncé est de mettre en évidence et de clarifier le rôle de l'observateur : il peut alors choisir d'exploiter l'information qu'il acquiert lors de la détection du photon annonciateur pour modifier les mesures auxquelles il peut encore

-
41. Ce qui n'a pas toujours paru une évidence, compte tenu de la relation de conjugaison entre le nombre de photons portés par une onde et sa phase $\Delta n \Delta \varphi \geq 2\pi$; or pour un photon annoncé, $n=1$, précisément, et donc $\Delta n \sim 0$; mais justement, un photon individuel n'est plus, *en tant que tel*, un simple élément d'un ensemble de photons portés par une onde, etc.
42. Notons que, dans un souci de simplicité, on s'en tient ici *a priori* au cas de mesures compatibles entre elles, au sens des relations de Heisenberg, comme des mesures de temps d'arrivée, sans chercher les combinaisons particulières de variables conjuguées nécessitant un examen plus détaillé (paradoxe EPR, violation des inégalités de Bell), comme le propose par exemple David WEINBAUM : « Spooky action at no distance. On the individuation of quantum mechanical systems », 2016, arXiv:1604.06775 [*physics.hist-ph*] (juin 2020).
43. (a) Il ne s'agit évidemment pas d'une règle générale. Même échu, le photon porteur du « bit » d'information confirmant un ordre de lancement de missile peut avoir une influence considérable sur son environnement. Mais ce type de scénario extrême concerne en fait un système complexe, qu'il n'y a guère de sens à projeter sur un unique photon, même crucial. (b) *Après* la mesure, il est légitime de les identifier comme deux objets distincts.

procéder sur le photon annoncé ;⁴⁴ l'observateur lui-même n'est alors plus séparable du contexte de mesure.

L'observateur est donc directement impliqué dans le processus d'individuation – qui ne vaut, en droit, que pour lui et, éventuellement, ceux avec lesquels il partage en temps utile⁴⁵ ses informations et son point de vue. Il se trouve ainsi littéralement intriqué avec l'objet individualisé.^{46,47}



5. Le récit quantique

Tout regard théorique doit donc assumer sa localité et, très généralement, le point de vue d'un système individualisé ne peut jamais être entièrement découplé du point de vue de l'observateur.³¹ Un objet quantique

-
44. Florian KAISER, Thomas COUDREAU, Perola MILMAN, Daniel B. OSTROWSKY & Sébastien TANZILLI, « Entanglement-enabled delayed-choice experiment », *Science*, **338**, pp. 637-640 (2012).
45. Si cette contrainte apparaît assez faible dans le cas d'un objet échu, elle peut s'avérer beaucoup plus forte dans le cas d'un objet quantique vif, le temps disponible pour modifier l'appareillage de mesure étant *a priori* limité.
46. Au sens par exemple où un *autre* observateur, qui ne disposerait pas du résultat de la mesure annonciatrice, pourrait constater une corrélation forte entre « l'état » du premier observateur (appelons-le Bob), prédisant la détection du photon vif à l'instant t_1 (resp. t_2, \dots, t_n) et le résultat de la mesure de l'instant de cette détection (i.e. t_1, \dots, t_n). S'il décrit le système complet (*Bob + photon vif*) comme une superposition d'états, celle-ci sera donc sous la forme intriquée : $|Bob \text{ prédisant } t_1, \text{ résultat } t_1\rangle + \dots + |Bob \text{ prédisant } t_n, \text{ résultat } t_n\rangle$ (donc sans aucune composante croisée du type $|Bob \text{ prédisant } t_1, \text{ résultat } t_2\rangle$).
47. On peut aussi considérer, dans l'interprétation de « réalisme contextuel » développée par Philippe Grangier, que les mesures réalisées définissent une *modalité* d'un *contexte* environnemental incluant l'observateur ; Alexia AUFFÈVES & Philippe GRANGIER, « Contexts, Systems and Modalities: a new ontology for quantum mechanics », *Found. Phys.*, 46, 2016, p. 121. *arXiv:1409.2120v2 [quant-ph]* (juin 2020).

dûment individué pour un observateur ayant connaissance de résultats de mesure le concernant peut ainsi rester noyé dans un état préindividuel pour un autre observateur qui n'en dispose pas.⁴⁸

Pour l'observateur ayant participé à ce processus d'individuation, il devient légitime de reconstruire l'histoire passée de cet objet quantique⁴⁹ comme, le cas échéant, de prédire son futur. En d'autres termes, d'en faire le sujet (ou l'un des sujets) d'un *récit*, c'est-à-dire, selon Paul Ricœur,⁵⁰ de rendre une réalité foisonnante simple et intelligible en sélectionnant très soigneusement les informations que l'on va raconter, la manière dont elles seront organisées et mis en forme lui donnant un début, un milieu et une fin.⁵¹

Temps et récit quantique

De ce point de vue, c'est sa *mise en récit* qui supplée à l'absence éventuelle de temps propre du monde quantique, que celle-ci soit liée à l'absence de mesures spécifiques (même si le temps propre existait, il resterait inconnaissable) ou à la nature du photon (singularité einsteinienne du référentiel se propageant à la vitesse de la lumière dans le vide), en lui substituant celui du récit (respectivement, temps *préfiguré* et temps *configuré*, « Mimésis I & II » dans le lexique de Ricœur⁵¹).

Dans le cas d'un objet quantique échu, c'est dans le temps de la mise en récit (Mimésis II) que l'on peut définir la relation avant/ après, donc un opérateur chronologique (R_2) d'individuation³¹. En ce sens, ce n'est donc pas tant la mesure quantique elle-même qui constitue un processus d'individuation que sa mise en récit par un observateur

48. Inversement, la simple existence d'une mesure dont on ne connaît pas le résultat peut en revanche modifier son état. Ainsi, en cryptographie quantique, tout processus d'individuation provoqué par un espion (« Ève », par convention) rendra son intervention décelable par le destinataire légitime du message (« Bob »).

49. Ainsi, une fois que l'on a enregistré le temps d'arrivée d'un photon sur un détecteur, il est parfaitement légitime d'identifier l'instant d'émission du photon échu ainsi individué, en retranchant du premier son temps de vol le long d'une trajectoire connue, alors que celui de l'émission de photons préindividuels ne peut avoir qu'une valeur statistique.

50. En toute rigueur, la définition ricœurienne du récit est toutefois nettement plus restrictive et peut comporter d'autres éléments que la seule mise en intrigue. Voir par ex. Annik DUBIED, « Une définition du récit d'après Paul Ricœur », *Communication*, vol. 19/2, 2000, pp. 45-66. Accessible en ligne : <https://journals.openedition.org/communication/6312> (juin 2020).

51. Paul RICŒUR, *Temps et récit*, 1983 ; Paris, Seuil, coll. Points essais, 1991 (3 tomes). Ricœur y distingue trois rapports mimétiques avec le temps : le temps agi par les sujets du récit (Mimésis I), le temps propre de la mise en récit (Mimésis II) et celui de la réception par le lecteur (Mimésis III).

(ou alternativement, d'un point de vue plus technologique, sa mise en mémoire).

Dans le cas d'un objet quantique individuel vif, c'est en revanche le temps du récipiendaire de l'annonciation – donc, si l'on veut pousser l'analogie littéraire, celui du *lecteur* du récit (temps *refiguré*, Mimésis III) – qui devient pertinent, dans la mesure où c'est aussi celui où se dérouleront d'éventuelles mesures, ou plus généralement d'éventuelles conséquences physiques ultérieures.

On est donc amené à distinguer dans ce cas deux niveaux de mise en récit, et deux opérateurs chronologiques d'individuation avant/après liés à la propriété de l'objet individué de devenir sujet :

- La mise en *récit quantique historique*,⁵² décrivant le comportement *passé* du sujet quantique.

Les éventuelles modifications de l'environnement macroscopique sont alors indirectes, médiatisées par *l'information* contenue (et figée) dans le récit, comme les résultats des mesures subies par l'objet, y compris le cas échéant d'une mesure destructive.⁵³ Ce processus d'individuation synchronique, *a posteriori*, est particulièrement adapté aux objets quantiques échus.

52. Le qualificatif peut paraître ambitieux, s'agissant d'une « histoire » essentiellement microscopique ; mais il présente le mérite de réactiver l'ancienne distinction aristotélicienne entre le *récit historique*, dont la vocation est de dire ce qui a effectivement été, dans un cas particulier, et la *poésie* dont la tâche est de lui donner un sens général. On pourrait en ce sens qualifier de « poétique » tout discours sur des objets quantiques préindividuels – dont on renonce *a priori* à parler autrement, même s'ils sont par construction beaucoup plus nombreux que les objets individués.

53. On peut prendre ici l'exemple de la cryptographie. Du point de vue d'un éventuel espion qui écouterait des échanges de données cryptées sans en connaître le code, il y a bien individuation des photons qu'il intercepte, mais seulement de type *R1* : le résultat de ses mesures n'est pas porteur de sens, donc non susceptible de modifier leur environnement. Pour autant, s'il enregistre systématiquement ces données, on pourra également avoir *a posteriori* une individuation de type *R2*, et des conséquences significatives, s'il vient à déchiffrer le code et à pouvoir lire le message enregistré.

Il s'agit d'un enjeu technologique considérable et très actuel, dans la mesure où la sécurité d'un très grand nombre d'opérations courantes (transactions bancaires, etc.) dépend de celle du cryptage des procédures d'identification des opérateurs, présumé suffisant compte tenu des puissances de calcul susceptibles d'être affectées à leur décodage. Or un changement d'échelle dans les performances des ordinateurs, lié par exemple au développement d'ordinateurs quantiques massivement parallèles, pourrait permettre non seulement de briser les codes futurs (dont on peut espérer qu'ils seraient durcis en conséquence), mais également de revenir sur l'ensemble des données cryptées ayant jamais transité sur internet et été enregistrées à cette fin.

- La mise en récit quantique prospectif, ouvert sur son comportement futur.

Il s'agit au contraire ici d'un processus d'individuation diachronique dont le produit est un sujet quantique vif restant susceptible de modifier son environnement – et d'être modifié par lui, y compris de façon opératoire^{54,55} – par interaction directe.

Notons que les deux types de récits quantiques ainsi définis sont des

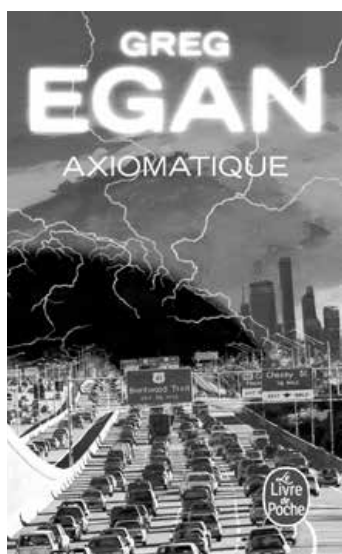


Illustration de MANCHU

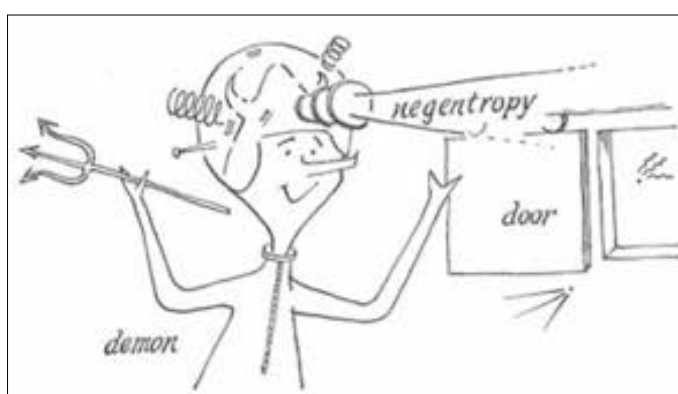
représentations du monde physique, tel qu'on le connaît par des résultats de mesure ; donc des modèles de celui-ci, des « *instrument[s] heuristique[s]* » qui, pour citer de nouveau Ricœur, « *vise[nt], par le moyen de la fiction, à briser une interprétation inadéquate et à frayer la voie à une interprétation nouvelle plus adéquate* ». ⁵⁶ De ce point de vue, ils doivent être distingués des fictions de pure imagination tentant soit de mettre en perspective l'histoire, factuelle ou non, des interprétations quantiques,⁵⁷ soit, de façon plus ambitieuse encore, de dire le monde quantique, comme certains textes de Greg Egan⁵⁸ ou de Stephen Baxter⁵⁹ ; si dans ces derniers, la mise en intrigue peut aussi, d'une certaine façon,

-
54. On a ainsi récemment montré qu'il était possible d'orchestrer des séries de mesures de telle manière qu'elles fournissent de l'énergie et de l'information à un objet quantique individué. Mahdi NAGHILOO, Jose Joaquin ALONSO, Alessandro ROMITO, Eric LUTZ & Kater W. MURCH, « Information Gain and Loss for a Quantum Maxwell's Demon », *Phys. Rev. Lett.*, **121**, 030604, 2018.
55. Il est intéressant de remarquer que ces auteurs, et d'autres à leur suite, ont adopté l'expression de « démon de Maxwell quantique », adoptant ainsi non seulement une approche assimilable à un récit, mais faisant par surcroît intervenir un personnage fictionnel (le démon) évoluant dans l'environnement macroscopique du sujet quantique (le *qbit*). Cf. *infra*, note 60.
56. Paul RICŒUR, *La Métaphore vive* (1975) ; Paris, Seuil, coll. Points essais, 1997 ; p.302 (éd. 1975).
57. Éric PICHOLLE, « Un laser uchronique pour questionner l'histoire des idées scientifiques », in *Espace et temps. La SF, un outil transversal pour l'histoire et la géographie*, dir. E. Blanquet, É. Picholle, S. Plantier & V. Thuin, Nice, Somnium, 2018, pp.257-284.
58. Par exemple : Greg EGAN, « Gardes-frontières » (« Border Guards », 1999) ; in *Océaniques*, Livre de Poche SF, 2012, pp.23-62. Pour une analyse plus détaillée des fictions « quantiques » de Greg Egan : « Dire le monde quantique », in *Greg Egan, la littérature au risque de la science*, *op.cit.*
59. Par exemple : Stephen BAXTER, *Flux* (1993) ; Le Béalial' éd., 2011.

constituer un processus d'individuation, celui-ci est d'une nature encore différente, associée au processus de *création* par l'auteur, non à un processus de *mesure*.

Ils doivent également être distingués des récits « mixtes », comme on en trouve dans certaines expériences de pensée qui n'hésitent pas à faire intervenir aussi bien des objets quantiques présumés individués que des sujets purement fictionnels, comme le démon de Maxwell^{60,61} que Léon Brillouin équipe d'une torche pour mieux l'exorciser.⁶²

Illustration extraite de
Maxwell's Demon 2,
par Harvey S. LEFF & Andrew F. REX
(IoP 1997, d.r.)



Un corollaire est que les définitions précédentes peuvent valoir aussi bien pour un discours formel que pour une narration en langage naturel d'une suite d'événements physiques, dans la mesure où elles ne préjugent en aucune façon de sa qualité littéraire.

60. Le démon de Maxwell est un petit personnage imaginé par James Clerk Maxwell pour violer le second principe de la thermodynamique. Manipulant une porte séparant deux compartiments d'une boîte remplie d'un gaz à une température donnée T , le démon s'arrange pour laisser passer seulement les molécules les plus rapides dans un sens, et les molécules les plus lentes dans l'autre. L'un des compartiments se retrouve ainsi statistiquement comporter plus de molécules rapides, donc d'un gaz plus chaud ($T_1 > T$), et l'autre plus de molécules lentes, donc d'un gaz plus froid ($T_2 < T$), ce qui est en contradiction avec le second principe. Voir James Clerk MAXWELL, *La Chaleur : leçons élémentaires sur la thermométrie, la calorimétrie et la thermodynamique (Theory of Heat, 1872)* ; Hachette Livre-BNF, 2012.
61. Voir aussi dans le présent ouvrage : « Le Modèle n'est pas le territoire », pp. 19-34.
62. Léon Brillouin remarquera toutefois que, pour pouvoir distinguer les molécules « rapides » des molécules « lentes » et décider de leur ouvrir ou non sa porte, le démon devra d'une manière ou d'une autre mesurer leur vitesse (par exemple en les éclairant avec une torche), donc investir lui-même dans cette mesure une quantité d'information (donc de « négentropie ») dont le calcul montre qu'elle est au moins égale à celle « gagnée » en manipulant la porte : le second principe est sauvé... LÉON BRILLOUIN, *Science and Information Theory*, New York, Academic Press, 1956, pp. 164-168. (Étrangement, ce chapitre est absent des éditions françaises du livre).

Légitimité et contraintes du récit quantique

Revendiquer une possible légitimité scientifique de récits quantiques en langage naturel pourrait sembler en opposition directe avec les préconisations formalistes de l'école de Copenhague. Ce n'est à notre sens pas le cas, dans la mesure où ces dernières s'appliquaient en fait implicitement – et avant l'émergence de ce concept simondonien – aux seuls objets quantiques *préindividuels*, quand les récits quantiques tels que nous les définissons ne sont légitimes que s'ils prennent pour sujets des objets quantiques individués. On peut d'ailleurs noter que Bohr lui-même, lorsqu'il se laisse entraîner par Einstein dans l'analyse détaillée d'expériences de pensée portant sur des objets quantiques clairement individués – avec le même *caveat* –, ne dédaigne pas de le faire en langage naturel.⁶³

Par ailleurs, un objet quantique donné n'étant *a priori* individué que pour un observateur, ou une famille d'observateurs, donné, les changements de point de vue, qui font le sel de la plupart des récits littéraires, sont à manier avec la plus grande précaution dans les récits quantiques. De même, les changements de sujet auxquels on pourrait être tenté de procéder pour décrire des événements impliquant plusieurs objets quantiques.

Ainsi, le récit quantique de la constitution d'un condensat de Bose-Einstein d'atomes froids peut-il s'avérer problématique : le même événement quantique qui consiste, pour un atome dûment individué, à rejoindre le condensat peut aussi bien être considéré comme un processus d'individuation du condensat (si celui-ci ne l'était pas encore) que comme un processus de *désindividuation* de cet atome particulier. Notons qu'on touche sans doute ici à la différence essentielle entre Simondon, « *penseur du saut quantique comme modalité plénière de l'individuation* »^{64a} pour lequel un tel processus de communion entre l'individuel et le collectif, relevant du « *couple individu-milieu* » dans son lexique, est perçu de façon très positive, au cœur même du processus d'individuation qui n'avait pas « *épuis[é] d'un seul coup les potentiels de*

63. Bien au contraire, il considère que « *toutes les mesures physiques étant exprimées dans le langage classique, il est nécessaire de spécifier en détail les outils de mesure dans le même langage* ». Abraham PAIS, « Einstein and the quantum theory », *op. cit.*, p. 902.

64. Bernard STIEGLER, « Le Théâtre de l'individuation. Déphasage et résolution chez Simondon et Heidegger », in *Technique, monde, individuation. Heidegger, Simondon, Deleuze*, dir. J.-M. Vaysse, Zurich:OLMS éd., 2006, pp. 57-73. (a) p. 60 ; (b) p. 61.

la réalité préindividuelle»⁶⁵ ; et Heidegger, pour lequel il s'agirait plutôt d'une déchéance de l'individu, perçue presque sur le mode tragique,^{64b} le *dasein* n'étant plus lui-même mais «perdu dans le nous-on»⁶⁶.

Le même exemple permet de souligner une seconde facette, plus littéraire, de cette contrainte majeure du récit quantique : même stimulé⁶⁷ et extrêmement probable dans certaines circonstances, un événement quantique n'en reste pas moins probabiliste, donc contingent, tant qu'il n'a pas été observé ou annoncé. Or la mise en intrigue littéraire tend à inverser l'effet de contingence en effet de nécessité ou, plus précisément pour Paul Ricœur, à «transmue[r] la contingence physique, adverse de la nécessité physique, en contingence narrative, impliquée dans la nécessité narrative».⁶⁸ Là encore, sauf s'il concerne un objet quantique non seulement dûment individué, mais dont on sait⁶⁹ qu'il a effectivement participé à l'événement mis en récit, le récit quantique ne sera *a priori* légitime que s'il est structuré de manière à clairement désamorcer cette nécessité narrative.

Au-delà de telles considérations philosophiques, force est de constater que la légitimité concrète des récits quantiques s'est d'elle-même imposée dans les laboratoires, concomitamment avec une nette relaxation des contraintes associées aux discours quantiques. Là où, dans les

65. Gilbert SIMONDON, *L'Individuation à la lumière des notions de forme et d'individuation*, op. cit., pp. 24-25.

66. Martin HEIDEGGER, *Être et temps*, op. cit., p. 377.

67. La stimulation bosonique se traduit ici par le fait que la probabilité qu'un atome donné change d'état pour rejoindre le condensat est proportionnelle au nombre d'atomes déjà présents dans le condensat, dans le même état exactement. Celui-ci pouvant se compter en millions, voire en milliards, pour des condensats macroscopiques d'atomes froids, cette probabilité peut devenir très grande, mais ne relève jamais de la certitude.

68. «Le paradoxe de la mise en intrigue est qu'elle inverse l'effet de contingence, au sens de ce qui aurait pu arriver autrement ou ne pas arriver du tout, en l'incorporant en quelque façon à l'effet de nécessité ou de probabilité, exercé par l'acte configurant. L'inversion de l'effet de contingence en effet de nécessité se produit au cœur même de l'événement : en tant que simple occurrence, ce dernier se borne à mettre en défaut les attentes créées par le cours antérieur des événements ; il est simplement l'inattendu, le surprenant, il ne devient partie intégrante de l'histoire que compris après coup, une fois transfiguré par la nécessité en quelque sorte rétrograde qui procède de la totalité temporelle menée à son terme. Or cette nécessité est une nécessité narrative dont l'effet de sens procède de l'acte configurant en tant que tel ; c'est cette nécessité narrative qui transmue la contingence physique, adverse de la nécessité physique, en contingence narrative, impliquée dans la nécessité narrative.»
Paul RICŒUR, *Temps et récit*, op. cit., t. 1, pp. 169-170.

69. Par une mesure, directe ou indirecte. La probabilité *a posteriori* d'un événement dont on sait qu'il a eu lieu étant de 1, celui-ci, par construction, n'est plus contingent.

années 1980, un emploi jugé par trop désinvolte du terme | photon | aurait immédiatement induit un rappel à l'orthodoxie (« *Peut-être, mais dans quelle jauge ?* »⁷⁰...) – et *a fortiori* du syntagme | un photon | (« Un photon, c'est un photon. A-t-on vraiment mesuré le nombre de photons ? ») – ou, *horresco referens*, du concept même de « phase d'un photon »,⁷¹ les mêmes expressions et les discours « avec les mains »⁷² que l'on peut bâtir autour d'elles sont aujourd'hui d'usage courant et ne semblent plus problématiques.

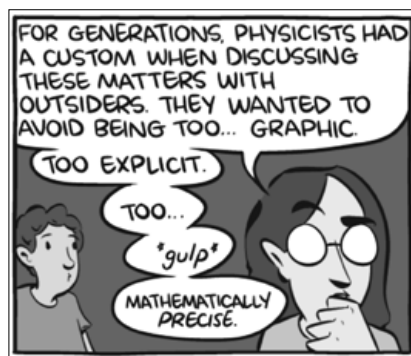


Illustration extraite de
« The Talk »⁷³
de Scott AARONSON & Zach WEINERSMITH

6. *Da capo*

Sans doute cet article est-il déjà trop technique et trop long pour ces actes « sciences & fictions » – et pas encore assez pour convaincre les véritables techniciens des trop nombreuses disciplines convoquées, de la philosophie à la physique fondamentale et appliquée en passant par l'histoire des sciences et des techniques... J'espère néanmoins qu'il aura pu contribuer à apporter un éclairage original sur la question, presque aussi ancienne que la mécanique quantique elle-même, de la légitimité des discours sur le monde quantique.

70. En théorie quantique des champs, la « jauge » est ce qui définit les invariants d'un système donné – et, partant, les vecteurs des interactions entre particules, comme les photons. Un bémol s'impose toutefois ici : cette rigueur lexicale était caractéristique de la communauté quantique fondamentaliste, celle de la physique atomique et des théoriciens ; les spécialistes de physique appliquée, eux, n'hésitaient pas à abuser du terme photon, depuis les années 1950 et l'invention du laser au moins. Il est sans doute significatif que le CNRS, par exemple, ait soigneusement évalué ces deux communautés *via* deux commissions distinctes (04 et 08, pour les connaisseurs). Cf. Éric PICHOLLE, « Le Laser ou l'impensable ingénierie quantique », *op. cit.*

71. Louis DE BROGLIE, « La Relation d'incertitude $\delta n \cdot \delta \varphi \geq 2\pi$ », *op. cit.*

72. Pour un physicien, l'expression pourrait être plus ou moins équivalente à « *sans démonstration rigoureuse* ».

73. Scott AARONSON & Zach WEINERSMITH, « The Talk », *Shtetl-Optimized*, 14 déc. 2016. Accessible en ligne : <https://www.smbc-comics.com/comic/the-talk-3> (juin 2020).