



**HAL**  
open science

## La mécanique quantique relationnelle

Martino Lobue

► **To cite this version:**

Martino Lobue. La mécanique quantique relationnelle. En attendant Nadeau, 2021, 141, pp.47.  
hal-03828023

**HAL Id: hal-03828023**

**<https://hal.science/hal-03828023>**

Submitted on 3 Nov 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.

## La mécanique quantique relationnelle

***Dans le domaine des fondations de la mécanique quantique (MQ), le consensus fait défaut. Un livre comme Helgoland, qui expose une interprétation des phénomènes quantiques connue sous le nom de mécanique quantique relationnelle (MQR), ne peut que témoigner d'un certain esprit polémique. Le physicien italien Carlo Rovelli n'a pas peur de la controverse, et son dernier ouvrage en est la preuve. Pour qu'il soit plus accessible, le texte est organisé sous la forme d'un voyage intellectuel, d'un itinéraire entre histoire des sciences et biographies de physiciens ainsi que de philosophes, accompagné de quelques incursions littéraires et poétiques.***

par Martino Lo Bue

---

Carlo Rovelli

*Helgoland.*

*Le sens de la mécanique quantique*

Trad. de l'italien par Sophie Lem

Flammarion, 272 p., 21,90 €

---

Le voyage commence sur l'île de Helgoland, en Allemagne, durant l'été 1925. Werner Heisenberg, vingt-trois ans, s'y est réfugié afin de pouvoir méditer sur la théorie des quanta. Nous sommes *in medias res*, la révolution quantique a débuté en 1900 quand Max Planck a publié les résultats de ses études sur la distribution spectrale de la radiation du corps noir, montrant que l'absorption et l'émission de lumière doivent avoir lieu de façon discrète, par quanta. En 1905, Einstein a expliqué l'effet photoélectrique en utilisant les quanta de Planck. Cette année-là, Max Born, Niels Bohr et Erwin Schrödinger avaient une vingtaine d'années, tandis que la plupart des physiciens qui allaient formuler la théorie quantique à partir de 1925, la menant à ses conséquences les plus étonnantes, Heisenberg, Jordan, Pauli, Dirac, n'avaient pas dépassé l'âge de cinq ans. Il n'est pas étonnant que la révolution qui suivit, comme le répète souvent Rovelli dans son livre, ait été considérée comme une révolution de jeunes. La question générationnelle n'est pas anodine. Les « vieux », Einstein, Born, Bohr et Schrödinger (tous nés au XIX<sup>e</sup> siècle), se diviseront en deux camps, l'un sceptique (Einstein et Schrödinger) et l'autre, mené par Bohr, à l'œuvre pour créer la justification de la nouvelle théorie. Les jeunes, tous nés entre 1900 et 1911, adhèrent

sans difficulté à la lecture de Bohr, connue depuis comme « interprétation de Copenhague ».

À son retour à Göttingen, Heisenberg discute avec Max Born de la théorie qu'il a formulée ; la même année, sont publiés les articles qui fondent la formulation matricielle de la MQ (les auteurs en sont Heisenberg justement, Born et Jordan, et peu après Dirac). En février 1927, d'abord dans une lettre adressée à l'ami Pauli, ensuite dans un article, Heisenberg formule le principe d'indétermination qui portera son nom, l'extrapolant directement à partir de l'algèbre non commutative des matrices qu'il utilise pour décrire le comportement des objets à l'échelle atomique. Les jeunes, Heisenberg, Jordan et Dirac, ont assez rapidement explicité les aspects de la MQ entrant en conflit avec les paradigmes dominant chez les scientifiques de l'époque. En premier lieu, l'impossibilité de connaître simultanément toutes les variables définissant l'état d'un système, une conséquence de l'algèbre non commutative, semble une attaque frontale contre le déterminisme, ce dernier s'appuyant sur le déni de toute limite de principe à la connaissance d'un système physique. Ensuite, la structure même de la théorie, décrivant moins des objets que l'opération consistant à observer ces objets, semblait s'éloigner du réalisme, en considérant enfin l'influence de l'observateur sur la réalité observée comme impossible à éliminer et même comme fondatrice de cette réalité. D'une part, le spectre du subjectivisme apparaissait chez les scientifiques et suscitait une vive inquiétude ; d'autre part, la nécessité que l'observation d'un système physique le modifie chassait de la physique un concept qui lui

### LA MÉCANIQUE QUANTIQUE RELATIONNELLE

était cher, celui de super-observateur, tel le démon de Laplace, qui, connaissant toutes les variables s'appliquant à tous les objets de l'univers, pourrait en déduire le passé comme le futur.

L'une des propriétés les plus troublantes énoncées par la nouvelle théorie est le principe de « superposition quantique » : les variables caractérisant l'état, voire l'existence, d'un objet peuvent se trouver sous la forme d'une superposition de différentes valeurs, appelée « état mixte ». Dans cette situation, la théorie ne nous permet de calculer que la probabilité d'obtenir telle ou telle autre valeur comme résultat de l'observation de l'objet. Ce dernier ne se trouverait dans un état avec une valeur définie, dit « état pur », qu'après la mesure. En outre, l'acte de mesure produisant un état pur par rapport à une certaine variable en pousserait une autre dans un état mixte. Cela rend impossible la connaissance exacte et simultanée des deux variables, la mesure de l'une augmentant l'information sur cette dernière mais réduisant l'information sur l'autre.

Le camp des sceptiques, Einstein en tête, interpréta cette incapacité de prédire l'état physique d'un système comme une limite de la MQ ; il y aurait une ou plusieurs variables décrivant de façon exacte la réalité qui ne sont pas prises en compte par la théorie. Le paradoxe le plus connu, découlant du principe de superposition, fut formulé par Schrödinger en 1935. Un chat, enfermé dans une boîte, dont l'état de veille ou de sommeil (on respecte ici le choix de Rovelli qui ne veut pas tuer le félin) dépend de l'état d'un objet quantique, se trouverait dans un état mixte veille-sommeil jusqu'au moment où un observateur ouvrirait la boîte. Que le chat aperçoit-il avant qu'on l'observe ?

Au cours de cette même année 1935, Einstein élaborait, avec deux collègues – Boris Podolsky et Nathan Rosen –, un autre paradoxe, dit « EPR » d'après les initiales de ses créateurs. Imaginons que nous ayons deux gants quantiques de la même couleur, enfermés dans une boîte, se trouvant dans un état de superposition quantique rouge-noir. La théorie nous dit exactement avec quelle probabilité on trouvera, à l'ouverture de la boîte, deux gants rouges ou deux gants noirs. On sépare la boîte en deux parties, sans l'ouvrir, on en envoie une à Marseille et l'autre à Pékin. Aujourd'hui, on dit que les deux boîtes sont intriquées quantiquement (« *entangled* », en anglais).

Si l'on ouvre les deux boîtes dans un délai de temps inférieur au temps nécessaire à un signal voyageant à la vitesse de la lumière de se propager de l'une à l'autre, comment le gant de Marseille fera-t-il pour préserver sa corrélation avec celui de Pékin et vice versa ? Autrement dit, si les deux gants se trouvent dans un état mixte, comment pourra-t-il se produire que l'observation à Marseille et l'observation à Pékin donnent comme résultat final deux gants de la même couleur ?

On n'a pas grand choix : ou bien on viole la relativité restreinte admettant la propagation d'un signal à une vitesse supérieure à celle de la lumière – on parle dans ce cas de non-localité de la théorie –, ou bien les deux gants étaient dès le début d'une couleur définie, il existe alors une variable cachée et donc la théorie est incomplète, ou bien encore on admet qu'un fait (la couleur des gants extrapolée de la connaissance d'un des deux gants) puisse avoir une valeur relative pour deux observateurs différents. Einstein souhaitait montrer l'absurdité de la MQ au moyen de ce qu'on appelle aujourd'hui un « *no-go theorem* ». Mais, sans le savoir, il jetait alors les bases de ce qu'Alain Aspect, qui en est l'un des protagonistes, appelle la deuxième révolution quantique. En effet, la réponse ne viendra pas tout de suite. On la connaît aujourd'hui grâce à John Stewart Bell, qui, en 1964, montra que la corrélation entre une série de plusieurs mesures faites sur les deux gants intriqués ferait apparaître une inégalité, qui porte désormais son nom, si les deux gants étaient dans un état de couleur bien défini dès le début, c'est-à-dire s'il y avait une variable cachée rendant la MQ incomplète. En 1981 et 1982, deux articles signés Alain Aspect, Philippe Grangier et Gérard Rogier rendent compte de la réalisation de l'expérience qui, mesurant la corrélation de la polarisation de photons intriqués, vérifie la violation de l'inégalité de Bell, confirmant ainsi qu'il n'y a pas de variable cachée (on en trouvera un compte rendu par Alain Aspect dans *Einstein et les révolutions quantiques*, CNRS Éditions). La voie permettant de sauver en même temps le réalisme et le principe de localité se ferme, et s'ouvre celle qui mène à l'application de l'intrication à la computation ainsi qu'à d'autres technologies qui font aujourd'hui l'objet d'une intense activité de recherche.

Comment Carlo Rovelli répond-il à ces problèmes avec son interprétation relationnelle ? D'abord, il opère une dépersonnalisation de la notion d'observation. Pour ce faire, il met en avant la notion d'information relative, formulée

### LA MÉCANIQUE QUANTIQUE RELATIONNELLE

par Shannon en 1948. Deux systèmes possèdent de l'information relative (Shannon parle en réalité d'entropie relative) quand il y a entre eux une corrélation qui rend le nombre de configurations possibles du système conjoint inférieur au produit du nombre de configurations des deux systèmes pris de façon isolée. Si on lance deux pièces indépendamment, chacune possède deux configurations possibles, ce qui donne pour le conjoint  $2 \times 2$  possibilités : pile-pile, face-face, pile-face, face-pile. Pas de corrélation ni d'information relative dans ce premier cas. Si, par contre, on colle les deux pièces sur du papier transparent avec les faces du même côté et qu'on les lance encore, on n'aura que deux issues possibles, pile-pile et face-face. Dans ce deuxième cas, chaque pièce possède de l'information relative par rapport à l'autre. Il est bon de souligner, comme le fait Rovelli, que l'information relative ne décrit qu'une corrélation physique n'impliquant aucune notion sémantique. L'approche relationnelle suppose que la MQ ne décrit que des interactions entre objets modifiant leur information relative. Chaque fait quantique constitue un gain et une perte d'information relative, comme le prévoit le principe d'indétermination. Ce flux d'information relative, selon Rovelli, est le monde. Il se rapproche ainsi de ce qui a été défini comme une ontologie relationnelle.

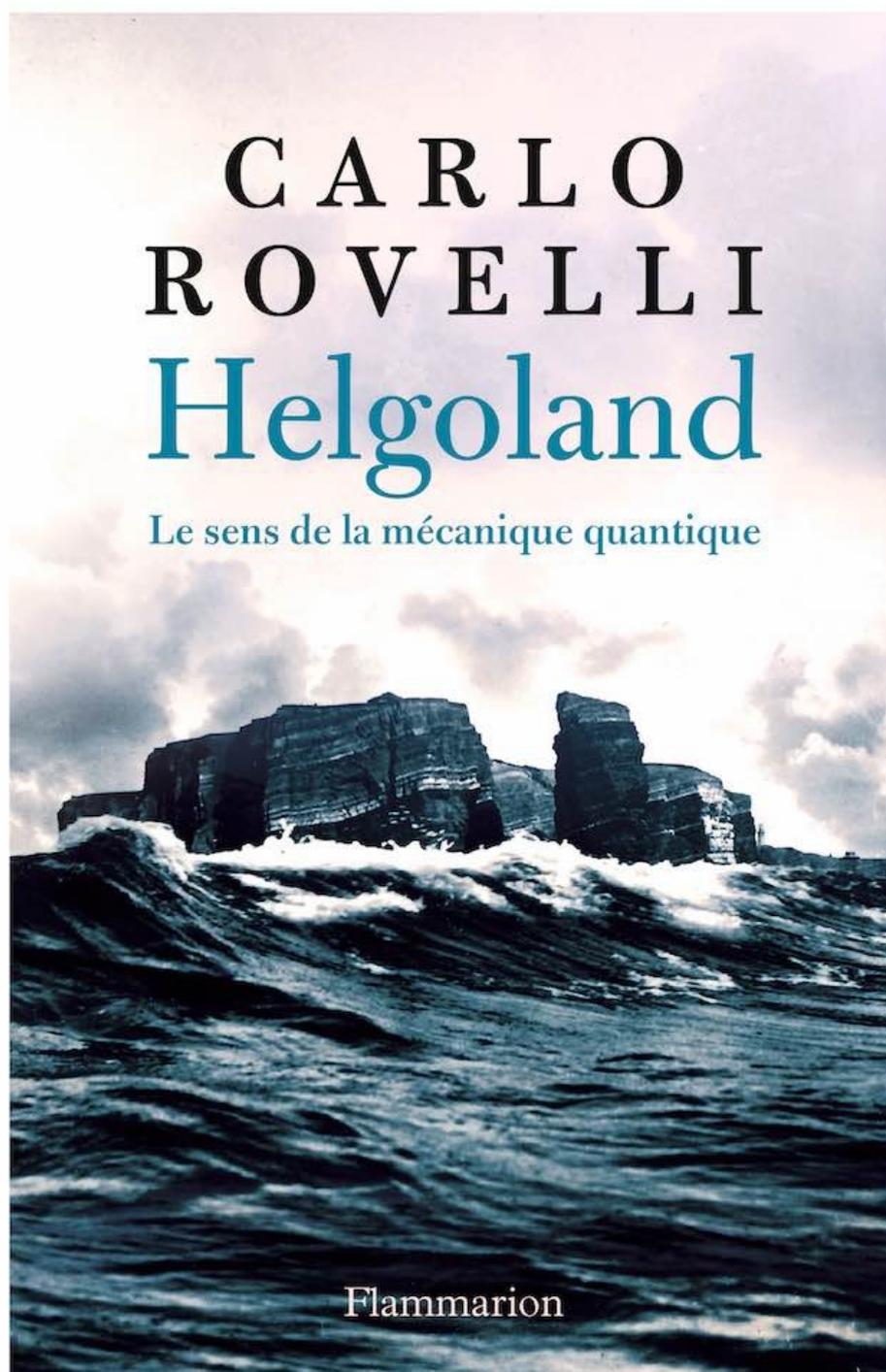
Si d'un côté la notion d'information relative permet d'éliminer l'asymétrie observateur-réalité qui hante l'interprétation de l'école de Copenhague, évitant ainsi de se rapprocher d'une vision subjectiviste, de l'autre l'ontologie relationnelle rompt avec le point de vue, cher au matérialisme, selon lequel le monde serait constitué d'objets élémentaires, les atomes. Dans la MQR de cette représentation, seuls restent les instants, dans l'espace-temps, correspondant aux interactions. Les propriétés des atomes entre une interaction et l'autre perdent leur fondement ontologique, n'existant que comme potentialité, voire comme probabilité qu'au cours de la prochaine interaction telle ou telle autre valeur se manifeste. Dans ce cadre, la vraie granularité du monde n'est pas constituée d'objets, les atomes, elle est plutôt constituée de faits, les interactions. L'architecture de ce réseau de faits est déterminée par la structure mathématique de la théorie.

Vue de cette façon, la MQ n'est pas incomplète car elle ne fait que décrire ce flux de faits qui constitue le monde. Elle n'est pas non plus non

locale car la réalité n'est constituée que d'interactions ; l'intrication entre les deux gants ne devient réelle qu'au moment où la chercheuse de Pékin, qui vient d'ouvrir sa boîte, envoie un mail à Carlo Rovelli à Marseille pour lui communiquer la couleur qu'elle a observée. Ce qui se passe avant que le mail soit adressé n'existe que dans le contexte du laboratoire de Pékin ou de celui de Marseille. De ce point de vue, comme Rovelli l'explique de façon assez approfondie, l'intrication est une danse à trois : ce ne sont pas seulement les deux gants intriqués qui comptent, mais aussi le fait d'établir le contact entre Marseille et Pékin. La réalité est donc constituée de faits, non d'états, et les faits sont relatifs à un contexte relationnel. Dans son livre, Rovelli plaide pour une réalité qui soit, dans son ensemble, décrite par des relations quantiques ; les faits « classiques » qu'on observe à l'échelle humaine ne seraient que des faits quantiques où superposition et interférences deviennent trop petites pour être observables à cause d'un phénomène appelé « décohérence ».

Dans *Helgoland*, Rovelli trace aussi une généalogie, fort personnelle certes, d'approches philosophiques relationnelles. Ainsi de la tension entre une vision du monde centrée sur les procès, vus comme un flux d'événements, et une autre fondée sur l'existence ; une tension qu'on peut faire remonter à l'opposition entre Héraclite et Parménide. De très belles pages sont dédiées à Ernst Mach et aux vicissitudes d'Alexandre Bogdanov qui proposa, dans la Russie post-révolutionnaire, une épistémologie basée sur celle de Mach et centrée sur la notion relationnelle d'« organisation », anticipant ainsi des concepts que la cybernétique et la théorie des systèmes rendront populaires une trentaine d'années plus tard.

En parcourant le livre de Carlo Rovelli, on se convaincra du fait que les approches relationnelles ont été au cœur du débat philosophique depuis toujours. On est tenté d'ajouter que la physique semble parvenir à la centralité des relations et à leur contextualité avec retard par rapport à d'autres disciplines. On pense, par exemple, à la théorie de la double contrainte (*double bind*, en anglais) développée par Gregory Bateson dans les années 1950. Cette théorie fut l'aboutissement d'une réflexion très générale qui, de l'anthropologie à la théorie de l'évolution, embrassait toute les sciences du vivant, tout en s'appuyant sur des méthodes dérivant de la théorie de l'information et de la cybernétique.



### LA MÉCANIQUE QUANTIQUE RELATIONNELLE

Une page de Bateson, dans le cinquième chapitre de *La nature et la pensée*, pourrait bien se trouver dans le livre de Rovelli. Bateson rappelle comment, au cours des recherches d'anthropologie qu'il menait en Nouvelle-Guinée juste avant la Seconde Guerre mondiale, il s'est aperçu qu'une mentalité essentialiste, s'appuyant sur l'attribution de propriétés intrinsèques à des individus, des organismes, des substances, est inadéquate pour décrire des réseaux relationnels. L'exemple choisi est assez éclairant : on a long-

temps attribué à l'opium une vertu dormitive alors que ce n'est que dans l'interaction entre l'opium et un organisme qu'un effet dormitif se manifeste. Bateson écrit : « *ce n'est qu'en restant fermement ancré à la primauté et à la priorité de la relation qu'on pourra éviter des explications dormitives [...] ce type d'explication déplaçant l'attention du contexte interpersonnel à des tendances propres fictives [...] à mon avis une grave erreur dont le seul effet est de cacher les vraies questions* ». Carlo Rovelli est-il en train de chasser, finalement, les explications dormitives de la physique ?