

CARLO
ROVELLI
Helgoland

Le sens de la mécanique quantique



Par l'auteur de
**L'ORDRE
DU TEMPS**

Flammarion

« Il était environ trois heures du matin lorsque le résultat de mes calculs apparut devant moi. Agité, je quittai la maison et me mis à marcher dans la nuit. Après avoir grimpé au sommet d'un rocher surplombant la mer, j'attendis le lever du soleil. J'étais profondément troublé. J'avais la sensation de regarder, à travers la surface des phénomènes, vers un intérieur d'une étrange beauté. »

Été 1925. Isolé sur l'île perdue d'Helgoland en mer du Nord, Werner Heisenberg a un éclair de génie : l'idée qui fonde la théorie des quanta. Avec Paul Dirac, Wolfgang Pauli et d'autres (très) jeunes physiciens, il en deviendra l'un des pères. Un siècle plus tard, la théorie fonctionne à merveille puisqu'elle rend compte du monde, de la couleur du ciel aux neurones de notre cerveau, en passant par le fonctionnement de nos ordinateurs et l'origine des galaxies. Son sens profond, en revanche, nous échappe toujours...

Dans son nouvel opus, Carlo Rovelli se fait volontiers passeur pour mieux nous raconter la « quantique » et en proposer aussi son interprétation personnelle, fruit d'une vie de recherche. Avec ce merveilleux message : la réalité est profondément différente de ce que nous imaginons.

CARLO ROVELLI est physicien théoricien, spécialiste de la gravité quantique. Il est notamment l'auteur de L'Ordre du temps (Flammarion, 2018), qui a connu un succès mondial.

Flammarion

Helgoland

CARLO
ROVELLI

Helgoland

Le sens de la mécanique quantique

Traduit de l'italien par Sophie Lem

Flammarion

L'ouvrage original a été publié
sous le titre *Helgoland* par les Éditions Adelphi.
© 2020 Adelphi Edizioni S.P.A. Milano.
© Flammarion, 2021, pour la traduction française.
ISBN : 978-2-0802-5174-9

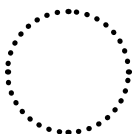
*à Ted Newman, qui m'a fait comprendre
que je ne comprenais pas la mécanique quantique.*

Sommaire

<i>Plonger son regard dans l'abîme.....</i>	9
PREMIÈRE PARTIE.....	17
I. « Un intérieur d'une étrange beauté. ».....	19
DEUXIÈME PARTIE.....	57
II. Un curieux bestiaire d'idées extrêmes.....	59
III. Est-il possible que quelque chose soit réel par rapport à toi, mais pas par rapport à moi ?	91
IV. Le réseau de relations qui tisse la réalité...	111
TROISIÈME PARTIE	139
V. « La description non ambiguë d'un phénomène inclut les objets auxquels le phénomène se manifeste. »	141

Helgoland

VI. « Pour la nature, le problème est déjà résolu. »	181
VII. « Où je tente de conclure une histoire qui n'est pas terminée. ».....	219
<i>Remerciements</i>	231
<i>Notes</i>	233
<i>Crédits photographiques</i>	251
<i>Index</i>	253



Plonger son regard
dans l'abîme

Časlav et moi sommes assis sur le sable, à quelques pas de la mer. Nous venons de parler intensément pendant des heures. Profitant de l'après-midi libre de la conférence, nous sommes partis sur l'île de Lamma, en face de Hong Kong. Časlav est l'un des experts les plus renommés de la mécanique quantique. Durant la conférence, il a présenté une analyse d'une expérience de pensée complexe. Nous en avons discuté et rediscuté sur le chemin qui longe la jungle jusqu'à la plage, puis ici, au bord de l'eau. Nous en arrivons à être pratiquement d'accord. Sur la plage, un long silence s'installe. Nous regardons la mer. C'est vraiment incroyable, chuchote Časlav, comment peut-on y croire ? C'est comme si elle n'existait pas... la réalité...

Voilà où nous en sommes avec les quanta. Après un siècle de résultats inouïs, la théorie la plus féconde de la science, qui nous a donné la technologie

Helgoland

contemporaine et la base de toute la physique du XX^e siècle, nous remplit encore d'étonnement, de confusion et d'incrédulité.

Il y a eu un moment où nous avons cru avoir élucidé la grammaire du monde : à la racine de toutes les formes variées de la réalité, il n'y avait que des particules de matière entraînées par quelques forces. L'humanité a pu penser qu'elle avait soulevé le voile de Maya et vu le fond de la réalité. Mais cela n'a pas duré ; trop de faits ne collaient pas.

Jusqu'à ce que, durant l'été 1925, un jeune Allemand de vingt-trois ans aille passer quelques jours d'une solitude agitée sur une île venteuse de la mer du Nord : Helgoland, l'Île sacrée. Là, il trouve une idée qui permet de rendre compte de tous les faits récalcitrants et de construire la structure mathématique de la mécanique quantique, la « théorie des quanta ». Peut-être la plus grande révolution scientifique de tous les temps. Le nom du jeune homme est Werner Heisenberg, et c'est avec lui que commence le récit de ce livre.

La théorie des quanta a clarifié les bases de la chimie, le fonctionnement des atomes, des solides, des plasmas, la couleur du ciel, les neurones de notre cerveau, la dynamique des étoiles, l'origine des galaxies, etc., mille aspects du monde. Elle est à l'origine des technologies les plus récentes, des ordinateurs aux centrales nucléaires. Des ingénieurs, des astrophysiciens, des cosmologistes, des chimistes et

Helgoland

des biologistes l'utilisent tous les jours. Ses rudiments figurent dans les programmes des lycées. Elle n'a jamais été prise en défaut. C'est le cœur battant de la science d'aujourd'hui. Pourtant, elle reste profondément mystérieuse. Subtilement inquiétante.

Elle a détruit l'image d'une réalité faite de particules se déplaçant le long de trajectoires définies, sans préciser toutefois comment penser autrement le monde. Ses mathématiques ne décrivent pas la réalité, elles ne nous disent pas « ce qu'il y a ». Des objets éloignés semblent reliés les uns aux autres comme par magie. La matière est remplacée par des ondes de probabilité fantasmatiques.

Quiconque s'arrête un instant pour se demander ce que la théorie quantique nous apprend sur le monde réel a de quoi rester perplexe. Einstein, qui en avait anticipé les idées en mettant Heisenberg sur la voie, ne l'a jamais digérée ; Richard Feynman, le grand physicien théorique de la seconde moitié du XX^e siècle, a écrit que personne ne comprend les quanta.

Mais c'est cela, la science : l'exploration de nouvelles façons de penser le monde. C'est la capacité que nous avons de remettre constamment en question nos concepts. C'est la force visionnaire d'une pensée rebelle et critique, capable de modifier ses propres fondements conceptuels, de redessiner le monde de zéro.

Si l'étrangeté de la théorie nous confond, elle ouvre aussi de nouvelles perspectives pour comprendre la réalité. Une réalité plus subtile que celle du matérialisme

Helgoland

simpliste des particules dans l'espace. Une réalité faite de *relations*, avant que d'objets.

La théorie suggère de nouvelles voies pour repenser les grandes questions, de la structure de la réalité à la nature de l'expérience, de la métaphysique à, peut-être, la nature de la conscience. Tout cela fait aujourd'hui l'objet d'un débat animé entre scientifiques et philosophes, et c'est ce dont je parle dans les pages qui suivent.

Sur l'île d'Helgoland, nue, extrême, balayée par le vent du Nord, Werner Heisenberg a soulevé un coin du voile entre la vérité et nous ; derrière ce voile, un abîme est apparu. Le récit de ce livre part de l'île où l'idée de Heisenberg a germé et s'élargit progressivement aux questions plus vastes ouvertes par la découverte de la structure quantique de la réalité.

hh

J'ai écrit ces pages en premier lieu pour ceux qui ne connaissent pas la physique quantique et qui sont curieux de comprendre ce qu'elle est et ce qu'elle implique, pour autant que nous en soyons capables. J'ai essayé d'être aussi concis que possible, en laissant de côté tout ce qui n'est pas essentiel, afin de saisir le cœur du problème. J'ai tenté d'être aussi clair que possible, sur une théorie qui est au centre de l'obscurité de la science. En fait, davantage que d'expliquer comment comprendre la mécanique quantique,

Helgoland

j'explique peut-être seulement pourquoi il est si difficile de la comprendre.

Mais j'ai aussi écrit ce livre en songeant à mes collègues scientifiques et philosophes, dont la perplexité s'accroît au fur et à mesure que leur connaissance de la théorie s'approfondit ; pour poursuivre le dialogue actuel sur la signification de cette physique stupéfiante. Le livre contient des notes destinées à ceux qui connaissent déjà bien la mécanique quantique. Elles expriment avec plus de précision ce que j'essaye de dire dans le texte de façon plus lisible.

Le principal objectif de mes recherches en physique théorique a été de percer la nature quantique de l'espace et du temps : rendre la théorie quantique cohérente avec les découvertes d'Einstein sur l'espace et le temps. J'ai fini par penser constamment aux quanta. Ce texte reflète l'état actuel de ma réflexion. Il n'ignore pas les positions différentes, mais il prend résolument parti. Il est centré sur la perspective que je considère comme la plus efficace et qui ouvre, je crois, les pistes les plus intéressantes : l'interprétation « relationnelle » de la théorie.

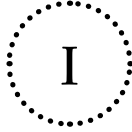
Un mot d'avertissement avant de commencer. L'abîme de ce que nous ne savons pas est toujours magnétique et vertigineux. Mais considérer la mécanique quantique sérieusement, réfléchir à ses implications est une expérience quasi psychédélique, qui nous force à renoncer, d'une manière ou d'une autre, à quelque chose qui nous semblait solide et inattaquable

Helgoland

dans notre compréhension du monde. Il nous faut accepter que la réalité est profondément différente de ce que nous imaginions. Plonger notre regard dans l'abîme, sans craindre de sombrer dans l'insondable.

Lisbonne, Marseille, Vérone, London (Ontario)
2019-2020

PREMIÈRE
PARTIE



« Un intérieur d'une étrange beauté. »

*Comment un jeune physicien allemand trouva une idée
vraiment étrange, qui décrivait toutefois très, très bien
le monde, et la grande confusion qui en résulta.*

1. L'idée absurde du jeune Werner Heisenberg : « les observables »

« **I**l était environ trois heures du matin lorsque le résultat de mes calculs apparut devant moi. Je me sentis profondément secoué. J'étais si agité qu'il me fut impossible d'aller dormir. Je quittai la maison et me mis à marcher dans la nuit. Je grimpai au sommet d'un rocher surplombant la mer situé à la pointe de l'île et attendis le lever du soleil¹. »

Je me suis souvent demandé quelles étaient les pensées et les émotions du jeune Heisenberg, perché sur son promontoire, sur l'île nue et venteuse d'Helgoland en mer du Nord, tandis qu'il contemplait l'immensité des flots en attendant le lever du soleil, après avoir le premier posé son regard sur l'un des secrets de la nature les plus vertigineux que l'humanité ait jamais entrevu. Heisenberg avait vingt-trois ans.

Helgoland

Il est sur l'île pour soulager l'allergie dont il souffre. À Helgoland, dont le nom signifie « terre sacrée », il n'y a pratiquement aucun arbre et donc très peu de pollen (« Helgoland, avec son arbre unique » – ainsi la nomme Joyce dans *Ulysse*). Heisenberg est surtout là pour s'immerger dans le problème qui le hante. La patate chaude que Niels Bohr lui a refilée. Il dort très peu, passe ses journées en solitaire, essayant de calculer quelque chose qui justifierait les règles incompréhensibles de Bohr. Il s'interrompt de temps en temps pour escalader les rochers de l'île ou pour apprendre par cœur des poèmes tirés du *Divan occidental-oriental* de Goethe, le recueil où le plus grand poète allemand chante son amour pour l'Islam.

Niels Bohr est déjà un scientifique renommé. Il a écrit des formules simples, mais étranges, qui prédisent les propriétés des éléments chimiques avant même que celles-ci n'aient été mesurées. Elles prédisent par exemple la fréquence de la lumière émise par les éléments chauffés : la couleur qu'ils prennent. Un succès remarquable. Les formules sont toutefois incomplètes, car elles ne permettent pas de calculer l'intensité de la lumière émise.

Mais, surtout, ces formules ont quelque chose de vraiment absurde : elles supposent, sans raison, que les électrons dans les atomes ne tournent autour du noyau que sur *certaines* orbites précises, à *certaines* distances précises du noyau, avec *certaines* énergies

« Un intérieur d'une étrange beauté. »

précises ; et qu'ils « sautent » ensuite, comme par magie, d'une orbite à l'autre. Les premiers « sauts quantiques ». Pourquoi seulement ces orbites ? Que sont ces « sauts » incongrus d'une orbite à l'autre ? Quelle force inconnue peut donc pousser un électron à adopter un comportement aussi bizarre ?

L'atome est la « brique élémentaire » de tout. Comment fonctionne-t-il ? Comment les électrons se déplacent-ils à l'intérieur ? Bohr et ses collègues tournent autour de ces questions depuis plus de dix ans. À vide.

À Copenhague, Bohr a réuni autour de lui les jeunes physiciens les plus brillants qu'il ait pu dénicher pour travailler sur les mystères de l'atome, comme dans l'atelier d'un peintre de la Renaissance. Parmi eux se trouve Wolfgang Pauli, brillant, intelligentissime, arrogant, audacieux, ami et camarade d'école de Heisenberg. Il recommande son ami Heisenberg au grand Bohr, en lui disant que, s'il veut progresser, c'est lui qu'il faut faire venir. Bohr suit son conseil et, à l'automne 1924, il invite aussi Heisenberg, qui est à l'époque l'assistant du physicien Max Born à Göttingen. Heisenberg reste quelques mois à Copenhague, à discuter avec Bohr devant des tableaux noirs remplis de formules. Le jeune homme et le maître font de longues promenades ensemble dans les montagnes tout en parlant des mystères de l'atome, de physique et de philosophie².

Helgoland

Heisenberg s'immerge dans le problème, il en fait son obsession. Il essaye tout, lui aussi, à l'instar des autres. Rien ne marche. Aucune force raisonnable ne semble pouvoir guider les électrons sur les étranges orbites et les non moins étranges sauts de Bohr. Pourtant, ces orbites et ces sauts permettent de prédire correctement les phénomènes atomiques. Confusion.

Le désespoir conduit à chercher des remèdes extrêmes. Seul sur son île de la mer du Nord, Heisenberg décide d'explorer des idées radicales.

Après tout, c'est avec des idées radicales qu'Einstein a sidéré le monde vingt ans plus tôt. Le radicalisme d'Einstein s'est avéré efficace. Pauli et Heisenberg sont épris de sa physique. Einstein est leur mythe. Le moment est-il venu, se demandent-ils, d'effectuer un pas tout aussi radical pour sortir de l'impasse des électrons dans l'atome ? Et si c'étaient eux qui le faisaient, ce pas ? À vingt ans, vos rêves n'ont pas de limite.

Einstein a montré que les convictions les plus enracinées sont parfois erronées. Ce qui semble évident n'est pas forcément exact. Pour parvenir à une meilleure compréhension, il est parfois nécessaire d'abandonner des hypothèses apparemment incontestables. Einstein enseigne à ne se fonder que sur ce que nous voyons, et non sur ce que nous pensons devoir exister.

Pauli rappelle souvent ces idées à Heisenberg. Les deux garçons se sont nourris de ce miel vénéneux.

« Un intérieur d'une étrange beauté. »

Ils ont suivi les discussions sur la relation entre réalité et expérience, qui parcourent la philosophie autrichienne et allemande au début du siècle. Ernst Mach, qui a eu une influence décisive sur Einstein, prêchait la nécessité de fonder la connaissance sur les seules observations, en se libérant de toute hypothèse « métaphysique » implicite. Tels sont les ingrédients disparates qui se mélangent dans les pensées du très jeune Heisenberg, comme les composants chimiques d'un explosif, lorsqu'il se réfugie sur l'île d'Helgoland à l'été 1925.

Et là, il a l'idée. Une idée qu'on ne peut avoir que dans le radicalisme sans limites de ses vingt ans. L'idée destinée à bouleverser toute la physique, toute la science, notre entière conception du monde. L'idée que l'humanité, je pense, n'a pas encore digérée.

hh

Le saut de Heisenberg est aussi simple que téméraire. Personne n'a réussi à identifier la force capable d'imprimer aux électrons leur comportement bizarre ? Abandonnons donc l'idée d'une nouvelle force. Utilisons celle que nous connaissons déjà : la force électrique qui attire l'électron vers le noyau. Nous ne trouvons pas de nouvelles lois du mouvement qui justifieraient les orbites et les sauts de Bohr ? Eh bien, contentons-nous des lois du mouvement que nous connaissons déjà, sans les modifier.

Helgoland

Changeons plutôt notre façon de penser l'électron. Renonçons à l'idée selon laquelle un électron serait un objet qui se déplace le long d'une trajectoire. Renonçons à décrire le mouvement de l'électron. Décrivons seulement ce que *nous observons de l'extérieur* : l'intensité et la fréquence de la lumière émise par l'électron. Fonder tout le raisonnement seulement sur des quantités *observables*, voilà l'idée.

Heisenberg essaye de recalculer le comportement de l'électron en utilisant uniquement les quantités que nous observons : la fréquence et l'amplitude de la lumière émise. Il tente de recalculer l'énergie de l'électron en partant de là.

Nous pouvons observer les effets des *sauts* de l'électron d'une orbite de Bohr à l'autre. Heisenberg remplace les variables physiques par des *tableaux de nombres*, où les orbites de départ sont indiquées dans les lignes tandis que les orbites d'arrivée figurent dans les colonnes. Chaque case du tableau se trouve à l'intersection d'une ligne et d'une colonne et décrit le saut d'une orbite donnée à une autre. Heisenberg passe son temps sur l'île à essayer d'exploiter ces tableaux pour calculer quelque chose qui justifierait les règles de Bohr. Il dort très peu. Il ne réussit pas à mener les calculs pour l'électron dans l'atome, ils sont trop compliqués. Il essaye alors avec un système plus simple, un pendule, et cherche les règles de Bohr pour ce cas simplifié.