

# Du déchiffrement des hiéroglyphes à l'interprétation de la mécanique quantique

Michel Gondran<sup>1</sup>, Alexandre Gondran<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Académie Européenne Interdisciplinaire des Sciences, Paris, France

`michel.gondran@polytechnique.org`

<sup>2</sup>École Nationale de l'Aviation Civile, Toulouse, France

`alexandre.gondran@recherche.enac.fr`

septembre 2022

## Résumé

RÉSUMÉ. A l'occasion du bicentenaire du déchiffrement des hiéroglyphes et du centenaire (99 ans) de l'introduction de la fonction d'onde de Louis de Broglie, nous montrons qu'il existe une analogie entre les difficultés du déchiffrement des hiéroglyphes par Thomas Young et Jean-François Champollion et les difficultés d'interprétation de la mécanique quantique. Ces difficultés proviennent dans les deux cas de l'existence simultanée de deux solutions demandant deux clés de lecture différentes. On montre que la prise en compte en mécanique quantique de cette double solution (fonction d'onde externe **et** fonction d'onde interne) permet de comprendre simplement la dualité onde-particule et de faire la synthèse des points de vue de Louis de Broglie, d'Erwin Schrödinger, de Marx Born et d'Albert Einstein.

*ABSTRACT. On the occasion of the bicentenary of the deciphering of hieroglyphics and the centenary (99 years) of the introduction of Louis de Broglie's function, this article shows that there is an analogy between the difficulties of deciphering hieroglyphics by Thomas Young and Jean-François Champollion and the difficulties of interpreting quantum mechanics. These difficulties arise in both cases from the existence of a double solution. Taking into account this double solution in quantum mechanics (external wave function and internal wave function) allows to understand simply the wave-particle duality and to synthesize the points of view of Louis de Broglie, Erwin Schrödinger, Marx Born and Albert Einstein.*

## 1 Introduction

En 1923, Louis de Broglie introduit la dualité onde-corpuscule en associant à toute corpuscule massique une onde. Un siècle plus tard, cette dualité est encore une énigme<sup>1</sup>. Pour essayer de la résoudre, nous allons nous inspirer à la fois d'un point de vue général de la science où *“la réalité physique existe à toutes les échelles, tandis que nos modèles de la réalité dépendent de l'échelle à laquelle on les décrit”*, et d'un point de vue particulier lié à l'analogie que l'on peut faire avec les difficultés du déchiffrement des hiéroglyphes où la solution est venue de la prise en compte de l'existence **simultanée** de deux solutions différentes, les idéogrammes et les phonogrammes. En effet, la difficulté principale du déchiffrement des hiéroglyphes égyptiens était qu'il existe essentiellement deux types de signes :

- les signes-mots ou idéogrammes qui désignent un concept (objet ou action),
- les signes phonétiques ou phonogrammes qui correspondent à un son (consonne, suite de consonnes ou voyelle)

Or pendant une longue période les hiéroglyphes furent perçus en Europe comme étant de purs idéogrammes. La solution du déchiffrement était donc de construire le dictionnaire de ces concepts dont la pierre de Rosette avec ses trois textes l'un en hiéroglyphes, le second en démotique et le troisième en grec devait permettre une solution rapide. L'idée selon laquelle les hiéroglyphes doivent comporter des éléments phonétiques se développe à la fin du 18<sup>ième</sup> siècle avec en particulier le Danois Jörgen Zoëga. Le Suédois Johan David Aberblad va jusqu'à soutenir que l'écriture égyptienne est uniquement phonétique [13]. C'est l'Anglais Thomas Young qui établit clairement en 1819 **la double nature des signes hiéroglyphiques**: selon leurs besoins, les scribes pouvaient utiliser un même signe de façon idéographique OU phonétique [13].

---

1. Il existe une multitude d'interprétations possibles sans consensus scientifique [29].

Thomas Young est également connu pour ses travaux sur la théorie ondulatoire de la lumière et le débat onde-particule sur la **double nature de la lumière** basée sur l'expérience dite des deux "fentes de Young" qu'il a développée dans une série d'articles de 1800 à 1807 [35]. Ces découvertes sont réalisées pendant la même période que ses premiers travaux sur les hiéroglyphes.

Cependant, c'est Jean-François Champollion qui va donner en 1822 la clé complète de ce déchiffrement en proposant une double solution complète en ajoutant la solution phonétique à la solution idéogramme (bien avancée grâce à la pierre de Rosette) dans sa "Lettre à M. Dacier relative à l'alphabet des hiéroglyphes phonétiques" [2] (voir Annexe 1).

Au paragraphe 2, nous montrons que les difficultés d'interprétation de la mécanique quantique proviennent, comme pour les hiéroglyphes, de l'existence simultanée de deux fonctions d'onde différentes (fonction d'onde externe et fonction d'onde interne) qui correspondent à deux échelles différentes. Au paragraphe 3, nous montrons que la fonction d'onde externe correspond à un champ non local qui "pilote" le centre de masse du corpuscule et qui converge vers la mécanique classique quand on fait tendre la constante de Planck vers zéro. Au paragraphe 4, nous montrons que la fonction d'onde interne est locale et correspond au corpuscule dans la dualité champ-corpuscule. En conclusion, nous évoquons comment cette double solution dépendant de l'échelle peut s'étendre au cas relativiste et à la seconde quantification.

En Annexe A, on rappelle les différentes étapes du déchiffrement des hiéroglyphes et en Annexe B, nous revisitons l'expérience des fentes de Young dans le cadre de cette double clef de lecture.

## 2 La double solution de la mécanique quantique

Pour un système quantique, tel un atome ou une molécule, il est bien connue [1] que la fonction d'onde complète (non relativiste) du système peut se décomposer en deux fonctions d'ondes vérifiant chacune une équation de Schrödinger : la *fonction d'onde du centre de masse dans le référentiel du laboratoire* et la *fonction d'onde relative dans le référentiel du centre de masse*. Nous appellerons **fonction d'onde externe** la fonction d'onde du centre de masse et **fonction d'onde interne** la fonction d'onde relative lorsqu'elle est renormalisée pour être considérée dans le référentiel du laboratoire.

En analogie avec les hiéroglyphes, nous faisons l'hypothèse que la principale difficulté de la compréhension de la mécanique quantique est que **l'état complet** d'un système quantique (non relativiste) **correspond à l'existence simultanée de ces deux fonctions d'onde** de nature très différente, mais reliées entre elles par un accord de phase comme Louis de Broglie en avait fait l'hypothèse dès 1923 [5]. On obtient ainsi la clef de la théorie de la double solution recherchée par Louis de Broglie (mais dans le cadre relativiste) en 1923 et durant toute sa vie [6, 7, 11].

Ces deux fonctions d'ondes ont des comportements très différents : la fonction d'onde externe s'étale au cours du temps tandis que la fonction d'onde interne reste confinée. Elles correspondent **expérimentalement** à des préparations différentes du système quantique. Ainsi dans les expériences de diffraction par une fente [21], d'interférences par deux fentes [20], de mesure du spin par Stern et Gerlach [19], de l'effet tunnel [23] ou de l'EPR-B [24], la préparation du système quantique est représentée par la seule fonction d'onde externe. Par contre, la représentation par la seule fonction d'onde interne (ou relative) est utilisée pour calculer les énergies du système quantique et les probabilités des transitions internes [4]. Il est intéressant de remarquer que la fonction d'onde externe est en fait la fonction d'onde introduite par de Broglie en 1923 tandis que la fonction d'onde interne est la fonction d'onde introduite par Schrödinger en 1926.

Ces deux fonctions d'onde correspondent à deux échelles différentes dans le même référentiel. **La nouveauté** est de se rendre compte qu'elles vont avoir des sens et **des interprétations différentes** basées sur **des limites mathématiques très différentes**, lorsque l'on fait tendre la constante de Planck  $\hbar$  vers zéro [27].

## 3 La fonction d'onde externe : le champ de la dualité champ-corpuscule

La fonction d'onde externe correspond à **l'échelle macroscopique** et s'étale au cours du temps. On démontre **mathématiquement** [27] la convergence, lorsque l'on fait tendre  $\hbar$  vers zéro, de la phase et du carré du module de la fonction d'onde externe vers une action et une densité classique vérifiant

les équations statistiques d'Hamilton-Jacobi.<sup>2</sup>

Il est important de rappeler que les équations statistiques d'Hamilton-Jacobi permettent de décrire l'évolution d'une densité de particules c-à-d le mouvement d'une **famille de particules** classiques : l'action d'Hamilton-Jacobi **pilote** la famille de particules dont seule la densité initiale  $\rho_0(\mathbf{x})$  est connue, mais non les positions initiales individuelles. Pour connaître la trajectoire d'une particule, il est nécessaire de compléter la description en ajoutant la position initiale de cette particule. On déduit de la continuité mathématique une continuité d'interprétation [27]: la phase de l'onde externe "pilote" le centre de masse  $X(t)$  du système quantique et correspond à **l'interprétation de Broglie-Bohm** (dBB) Pour connaître l'évolution du centre de masse  $X(t)$  du système quantique, il est nécessaire de connaître sa position initiale  $X(0)$ . On en déduit aussi que le carré du module de l'onde externe correspond à la densité de probabilité des centres de masse en accord avec l'interprétation de Born restreinte à cette fonction d'onde. On préfère utiliser l'expression *dualité champ-corpuscule* que celui de *dualité onde-particule* car l'action d'H-J correspond à un champs plus qu'à une onde.

Le principe de superposition et l'interprétation dBB s'appliquent pour la fonction d'onde externe, et non pour la fonction d'onde interne. Ainsi, le chat de Schrödinger et le qubit existent pour la fonction d'onde externe, mais non pour la fonction d'onde interne.

Dans l'expérience des fentes de Young, c'est **la fonction d'onde externe** qui passe **par les deux fentes** (voir Annexe B ). C'est aussi elle **la variable cachée non locale** du théorème de Bell et des expériences EPR-B [27]. Pour elle, les inégalités d'Heisenberg correspondent à des **relations d'incertitude** sur les positions et les vitesses des centres de masse d'un ensemble de molécules admettant cette même fonction d'onde.

## 4 La fonction d'onde interne : le corpuscule de la dualité champ-corpuscule

La fonction d'onde interne correspond à **l'échelle microscopique** et reste confinée au cours du temps. Elle correspond à l'évolution des particules composant le système quantique. **Mathématiquement**, lorsque l'on fait tendre  $\hbar$  vers zéro, le carré du module de la fonction d'onde interne devient ponctuel et converge vers la distribution de Dirac  $\delta(\mathbf{x} - X(t))$ , perdant ainsi la structure interne de l'atome ou de la molécule. Nous montrons [27] que l'interprétation la plus vraisemblable est celle proposée par Schrödinger pour qui les particules sont étendues [33].

Dans l'expérience des fentes de Young, la **fonction d'onde interne** passe **par une seule fente**. Une mesure correspond à l'impact de cette onde interne sur l'écran de détection. Étant confiné dans une portion localisée de l'espace, elle ne permet pas d'avoir une action à distance instantanée sur une autre portion de l'espace. Elle correspond au corpuscule de la dualité champ-corpuscule. La notion de réduction du paquet d'onde n'a pas de sens dans notre approche car il s'agit pour nous de deux fonctions d'onde différentes. La fonction d'onde (externe) ne se réduit pas en un impact lors d'une mesure, elle est simplement *transparente* à la mesure<sup>3</sup>, seule la fonction d'onde interne est perçue par la mesure c'est-à-dire localisé précisément dans une région : le point d'impact. Pour elle, les égalités d'Heisenberg correspondent à des **relations d'indétermination** sur les différentes positions et vitesses de cette particule étendue. Ainsi dans la dualité champ-corpuscule, la fonction d'onde externe définit le champs et la fonction d'onde interne correspond au corpuscule.

## 5 Conclusion: une grille de lecture pour la physique quantique et relativiste

Cette double interprétation dépendant de l'échelle est **une grille de lecture** permettant de donner un sens clair aux fonctions d'onde en mécanique quantique. La fonction d'onde externe définit un champ *impalpable* qui guide la fonction d'onde interne. Elle permet de retrouver les résultats statistiques de la mécanique quantique. La fonction d'onde interne représente, quant à elle, la réalité matérielle du corpuscule. Elle est nécessairement localisée dans une zone précise de l'espace, son centre de masse.

2. Cette action d'Hamilton-Jacobi  $S_{HJ}(\mathbf{x}, t)$  s'écrit à partir de l'action d'Hamilton-Jacobi  $S_0(\mathbf{x})$  à l'instant initial et des actions d'Euler-Lagrange  $S_{EL}(\mathbf{x}_0; \mathbf{x}, t)$  entre tous les chemins possibles de  $(\mathbf{x}_0, 0)$  à  $(\mathbf{x}, t)$

$$S_{HJ}(\mathbf{x}, t) = \min_{\mathbf{x}_0} (S_0(\mathbf{x}_0) + S_{EL}(\mathbf{x}_0; \mathbf{x}, t))$$

comme une intégrale de chemins min-plus[22, 28] d'une manière **analogue à l'intégrale de chemins de Feynman** [14], mais dans l'analyse min-plus, une analyse non linéaire que nous avons développée [16, 17] à la suite de Maslov [31, 34]

3. Comme l'action d'Hamilton-Jacobi en mécanique classique

Elle permet aussi de **comprendre et d’expliquer** simplement les autres interprétations qui ne font pas la différence entre les fonctions d’onde externe et interne.

Cette grille de lecture peut s’étendre au cas relativiste et à la seconde quantification et permet de mieux voir les relations existantes entre mécanique quantique, relativité et gravitation [26].

Enfin, cette double solution dépendant de l’échelle peut être testée expérimentalement comme nous l’avons proposé en 2008 [18] et le repropose de nouveau [25]. Cette double solution correspond bien à la vision de Louis de Broglie :

*Ayant une conception très “réaliste” de la nature du monde physique et peu porté aux considérations purement abstraites, je voulais me représenter l’union des ondes et des particules d’une façon concrète, la particule étant un petit objet localisé incorporé dans la structure d’une onde en propagation.*

Elle est peut-être aussi une réponse à un des derniers textes d’Albert Einstein sur l’interprétation de la mécanique quantique (1953), *Elementary Considerations on the Interpretation of the Foundations of Quantum Mechanics* [12] en hommage à Max Born :

*Le fait que l’équation de Schrödinger, associée à l’interprétation de Born, ne conduise pas à une description des “états réels” d’un système individuel incite naturellement à rechercher une théorie qui ne soit pas soumise à cette limitation. Les deux tentatives jusqu’à maintenant dans ce sens ont ceci en commun qu’elles conservent l’équation de Schrödinger et abandonnent l’interprétation de Born.*

*La première tentative, qui constitue un retour à de Broglie, a été poursuivie avec beaucoup de finesse par Bohm. [...] La deuxième tentative en vue d’obtenir une “description réelle” d’un système individuel qui soit fondée sur l’équation de Schrödinger est toute récente et émane de Schrödinger lui-même. L’idée générale est, en bref, la suivante : la fonction  $\Psi$  représente en elle-même la réalité et point n’est besoin de lui adjoindre l’interprétation statistique de Born. [...]*

*Des considérations précédentes, il résulte que la seule interprétation de l’équation de Schrödinger jusqu’à présent admissible est l’interprétation statistique donnée par Born. Cependant, celle-ci ne donne pas la “description réelle” du système individuel, elle ne produit que des énoncés statistiques relatifs à des ensembles de systèmes.*

Une double solution, comme pour les hiéroglyphes, est peut-être la clé de compréhension des équations : l’interprétation de Born et de Broglie-Bohm pour la fonction d’onde externe et l’interprétation de Schrödinger pour la fonction d’onde interne.

## A Les étapes du déchiffrement des hiéroglyphes

Champollion s’est appuyé sur les travaux d’autres chercheurs, notamment ceux de Thomas Young qui avait noté dès 1802 que les noms étrangers étaient retranscrits phonétiquement en démotique et en hiéroglyphes. En 1819, Young poursuit en montrant que dans le texte hiéroglyphique les lettres **P**, **T**, **O**, **L**, **M** et **S** correspondant au nom Ptolémaïos du texte grec. [13]

Le déchiffrement des hiéroglyphes phonétiques par Champollion s’est effectué en plusieurs étapes à partir de 1821. Il est alors convaincu de l’unité du système graphique égyptien: les trois écritures dérivent l’une de l’autre: hiéroglyphique (l’écriture sacré), hiératique (écriture cursive) et démonique (l’écriture de tous les jours) [3]. Il effectue les deux premières étapes à partir de la pierre de Rosette, qui contenait une même texte en trois langues, hiéroglyphes, démotique et grec. Il réalise les deux suivantes à partir de cartouches de pharaons grecs, puis égyptiens. La présentation en cinq étapes de sa démarche que nous faisons ci-dessous est empruntée à Sophie Laurent [30].

### A.1 Les deux premières étapes avec la pierre de Rosette

Dans la première étape qui date du 23 décembre 1821, Champollion compare le nombre d’hiéroglyphes d’une partie de la pierre de Rosette (1419) avec celui nettement inférieur (486) des mots grecs correspondants. Il en conclut que les hiéroglyphes ne sont pas seulement des idéogrammes, contrairement aux préjugés ambiants. Ils peuvent aussi, comme le pensait Thomas Young, dans un même texte servir de signe phonétique comme nos lettres de l’alphabet. Young est celui qui vient d’établir le caractère ondulatoire de la lumière avec sa célèbre expérience des deux fentes.

Dans la seconde étape, Champollion approfondit ces conclusions par l’étude du cartouche du roi Ptolémée qu’il a isolé, comme l’avait fait Young, sur la pierre de Rosette: Il est représenté par 8 hiéroglyphes pour les 10 lettres grecques “Ptolemaïos”, cf. Figure 1.



Transcription : PTOLÉMÉE

FIGURE 1 – Cartouche de “Ptolemaïos” (image d’après [30])

Toujours sur la pierre de Rosette, on trouve aussi en grec l’expression “Ptolémée aimé de Ptah” qui semble correspondre à une version plus longue du même cartouche, cf. Figure 2.

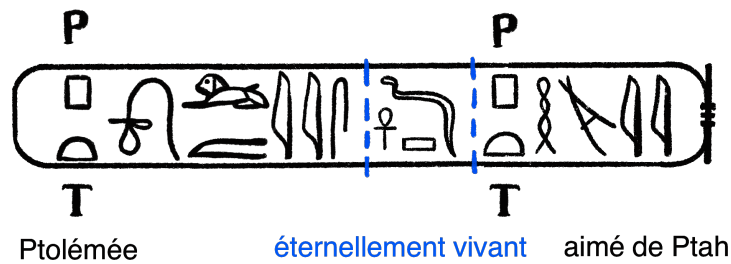


FIGURE 2 – Cartouche “Ptolémée aimé de Ptah” (image d’après [30])

Or dans ce cartouche, il retrouve les deux signes répétés un carré ( $\square$ ) et un demi-cercle ( $\triangle$ ), l’un au dessus de l’autre : il fait alors l’hypothèse qu’il s’agit du **P** et du **T** qui débutent le nom de Ptolémée et du dieu Ptah. Il lui est alors possible d’attribuer une valeur aux autres signes du cartouche, cf. Figure 3.



FIGURE 3 – La solution de “Ptolémée” (image d’après [30])

Cette deuxième étape est commune avec Young. Mais celui-ci fit l’erreur de penser que les signes phonétiques ne se rencontraient que dans les cartouches, ce qui le bloqua pour le suite du déchiffrement des hiéroglyphes [13]. Comme dans tout puzzle, la moindre erreur dans les hypothèses (postulats en mécanique quantique ?) va bloquer la suite et il faut avoir beaucoup de courage pour revenir en arrière.

## A.2 Les deux étapes avec les cartouches de Cléopâtre et de Ramsés

Dans la troisième étape, il réussit à déchiffrer tous les noms des pharaons grecs connus par les sources grecques et romaines. La clé lui est donné à partir du texte du socle d’un obélisque de Philae dont il reçoit une copie en janvier 1822. Il s’agit d’une dédicace en grec à la reine d’Egypte, Cléopâtre. Il repère dans le cartouche de “Kleopatra” les lettres **L**, **O**, **P** qu’il avait déchiffrées dans “Ptolemaïos”, cf. Figures 2 et 4.

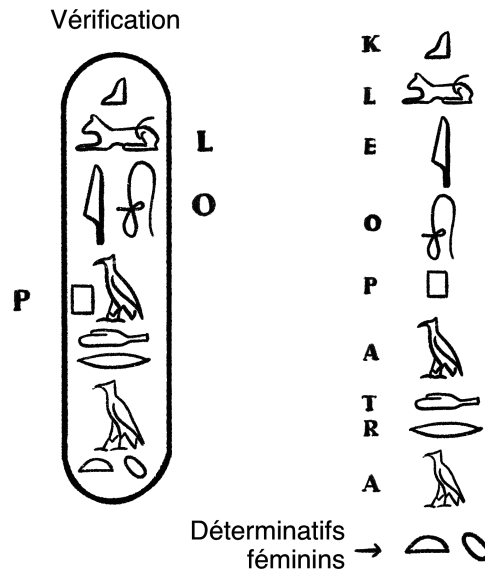


FIGURE 4 – La solution de “Kleopatra” (image d’après [30])

Il identifie alors les autres lettres découvrant que la main tendue correspond aussi au son **T** comme le demi-cercle. Il remarque aussi que les noms féminins se terminent par deux signes dont le demi-cercle et donc ne se prononce pas **T** mais indique le féminin. [30].

La quatrième étape est celle de l’existence simultanée de deux solutions fortement intriquées entre elles. D’un côté, il y a trop de hiéroglyphes (1419) pour qu’il s’agisse simplement d’un alphabet. D’un autre côté, il y en a pas assez pour qu’il s’agisse uniquement d’idéogrammes. La solution est entre ces deux approches. Sur le cartouche du haut de la figure 5 le premier hiéroglyphe représente un soleil, qui en copte se prononce “Ré”. Les deux derniers sont des **S**. Si l’hiéroglyphe du milieu se prononce **M** alors cela permet d’identifier ce cartouche comme celui de “Ré-m-ss”, ou Ramsès. L’hypothèse du son **M** se confirme sur un autre cartouche l’utilisant (figure 5 du bas) et où le premier signe représente un ibis, oiseau sacré symbole du dieu Thôt et le dernier est un **S**. Si l’hypothèse du son **M** est bonne, alors ce cartouche représente celui de “Thôt-m-sès” ou Thoutmosis, un pharaon.

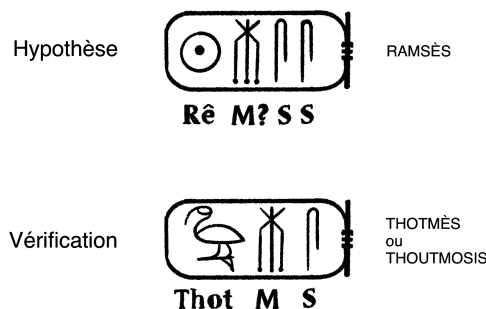


FIGURE 5 – L’hypothèse du M (image d’après [30])

On comprend mieux le sens de la lettre de Champolion à M. Dacier : “C’est un système extrêmement complexe, une écriture à la fois figurative [le soleil pour Rê], symbolique [l’ibis pour Thôt] et phonétique [les sons M et S] dans un même texte, une même phrase, je dirais presque un même mot” [30].

## B Fentes de Young avec des corpuscules massiques

L’expérience des fentes de Young a été réalisée initialement par Thomas Young (1773-1829) en 1804 et a démontré l’aspect ondulatoire de la lumière : plus de deux siècles plus tard, elle s’avère encore comme l’expérience cruciale dans le débat sur l’interprétation du dualisme onde-corpuscule. En effet, cette expérience simple présente les deux caractéristiques des phénomènes quantiques : le caractère ondulatoire au niveau macroscopique avec l’apparition de franges d’interférence après des milliers d’impacts, et le

caractère corpusculaire au niveau microscopique, lié aux impacts sur l'écran pouvant arriver un à un. Pour Richard Feynman [15], cette expérience réalisée avec des électrons aborde *“le point fondamental du comportement mystérieux [des objets quantiques (photon, électron, molécules)] sous son aspect le plus étrange. [C'est] un phénomène qu'il est impossible, absolument impossible d'expliquer de façon classique et qui contient le cœur de la mécanique quantique. En réalité, il en contient même l'unique mystère.”*

La figure 6 présente le schéma de l'expérience des fentes de Young. Une source émet un à un des

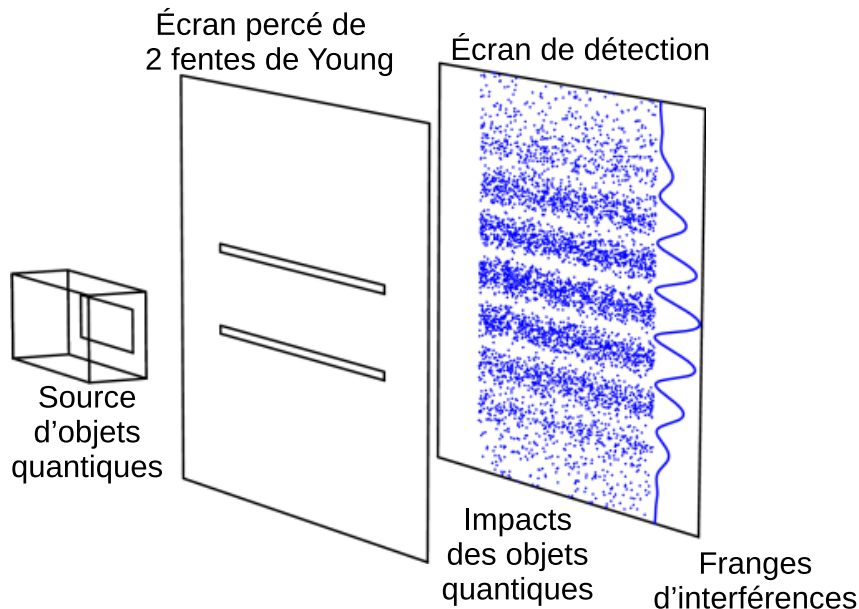


FIGURE 6 – Schéma de l'expérience de Young réalisée avec des objets quantiques individuels.

objets quantiques (photons, électrons, neutrons, atomes, molécules) dans le plan horizontal : tous ces objets sont préparés de la même façon, c'est-à-dire qu'ils ont la même fonction d'onde externe. Ces objets rencontrent une plaque percée de deux fentes horizontales. La plupart des objets quantiques sont arrêtés par cette plaque. Un écran situé après ces fentes récolte un à un les objets ayant traversés les fentes (aspect corpusculaire). L'impact de chaque objet apparaît sur l'écran au fur et à mesure que l'expérience se déroule. Au bout de quelques milliers d'impacts, leur répartition sur l'écran fait apparaître des franges d'interférence (aspect ondulatoire). Le caractère ondulatoire d'un objet quantique individuel ne se révèle donc que statistiquement.

## B.1 Simulation des interférences par la fonction d'onde du centre de masse

Dans toutes les expériences des deux fentes réalisées depuis quelques années avec des particules massives (électron, neutron, fullerene  $C_{60}$ ), il y a coïncidence entre la densité mesurée des particules avec la densité calculée en se basant uniquement sur la fonction d'onde du centre de masse de la particule et en ne tenant pas compte de l'état interne de la particule [32]. C'est ce que nous avons réalisé pour les fullerenes  $C_{60}$  dans les simulations numériques suivantes. Les données numériques proviennent de l'expérience de Zeilinger [32]. Les calculs sont réalisées en résolvant l'équation de Schrödinger dépendante du temps via les intégrales de chemins de Feynman [20].

La figure 7 donne l'évolution de la norme de la fonction d'onde externe au cours de l'expérience: son émission (à gauche, à  $-2mm$ ), puis son passage par les deux fentes (à  $0mm$ ), enfin son évolution après les fentes avant sa mesure sur l'écran de détection (à droite, à  $5mm$ ). Ainsi l'onde externe traverse les deux fentes et se recombine pour donner des interférences. On a ajouté en rouge l'évolution du centre de masse de la fonction d'onde interne d'une molécule de fullerene  $C_{60}$  de la source jusqu'à l'écran.

L'évolution en bleu de la norme de la fonction d'onde est commune à toutes les interprétations de la mécanique quantique. Elle est à la base de l'interprétation statistique de Born où cette norme de la fonction d'onde externe correspond à la densité de probabilité mesurée des électrons.

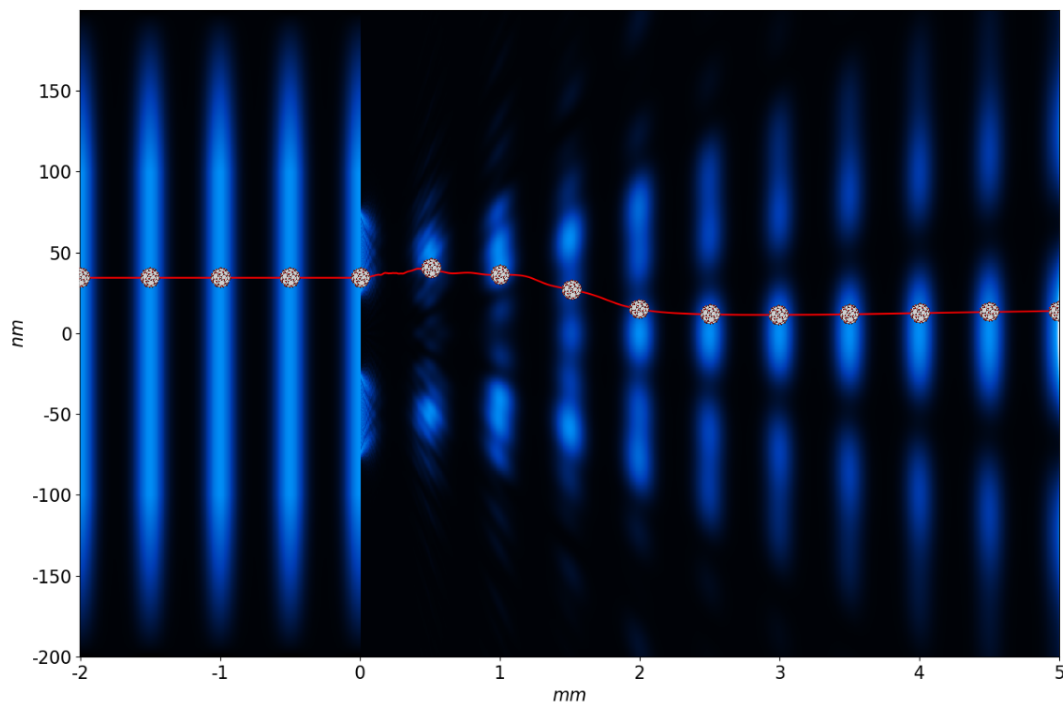


FIGURE 7 – Évolution (en bleu) de la norme de la fonction d’onde externe d’un fullerene  $C_{60}$  depuis sa source (à gauche) à l’écran de détection (à droite). Évolution (en rouge) du centre de masse de la fonction d’onde interne d’un fullerene  $C_{60}$  guidé par la fonction d’onde externe de la source à l’écran.

## B.2 Interprétation de Copenhague : onde OU (exclusif) corpuscule

Dans l’interprétation de Copenhague, qui est l’interprétation orthodoxe de la mécanique quantique, toujours en vigueur, le fullerene  $C_{60}$  est soit une onde soit un corpuscule, mais en aucun cas les deux à la fois (ou exclusif). C’est le principe de complémentarité de Bohr de 1927. Durant toute l’expérience, le fullerene  $C_{60}$  est seulement une onde qui traversent les deux fentes à la fois (Fig.7): il ne manifeste sa propriété corpusculaire qu’au moment de l’impact sur l’écran, phénomène appelé postulat de réduction du paquet d’onde. L’équation de Schrödinger ne prévoit qu’une probabilité du lieu de l’impact. Sa position effective dans l’interprétation de Copenhague est sans explication: c’est un aléa fondamental. C’est cette interprétation uniquement statistique que critiquaient de Broglie, Schrödinger ainsi que Einstein avec son “*Dieu ne joue pas aux dés*”. D’après lui, les prédictions aléatoires de la mécanique quantique ne provenaient pas d’un aléa “vrai” ou fondamental de la physique, mais d’une incomplétude du modèle: il devait exister un modèle sous-jacent qui explique ces aléas.

L’autre problème déroutant dans cette interprétation est qu’elle présente deux possibilités d’évolution de la fonction d’onde: soit grâce à l’équation de Schrödinger pour les interactions *normales*, soit la réduction du paquet d’onde si l’interaction est une *mesure*, la théorie ne préconisant rien sur le choix à faire [29]. C’est ainsi que cette interprétation nie même l’existence de la réalité avant la mesure par un observateur. Einstein cristallisait sa critique avec la formule suivante : “*J’aime à penser que la Lune est là, même quand je ne la regarde pas*”.

## B.3 Théorie de la double échelle : champ ET corpuscule

Dans l’interprétation de la double échelle, la molécule de  $C_{60}$  est décrite par **deux fonctions d’onde dans le référentiel du laboratoire**, la fonction d’onde externe qui correspond à un champ qui pilote le corpuscule et la fonction d’onde interne (fonction d’onde relative renormalisée dans le référentiel du laboratoire) qui représente la structure du corpuscule. Le champ et le corpuscule existe simultanément, ce qui permet de préciser clairement la notion de dualité onde-corpuscule et de résoudre naturellement les critiques précédentes sur les problèmes d’aléa et de mesure. La **fonction d’onde externe passe à travers les deux fentes** à la fois et la **fonction d’onde interne passe par une seule** des fentes.

La fonction d’onde externe est considérée comme un champ qui pilote le centre de masse du corpuscule quantique comme l’action d’Hamilton-Jacobi pilote le centre de masse des objets classiques. Plus



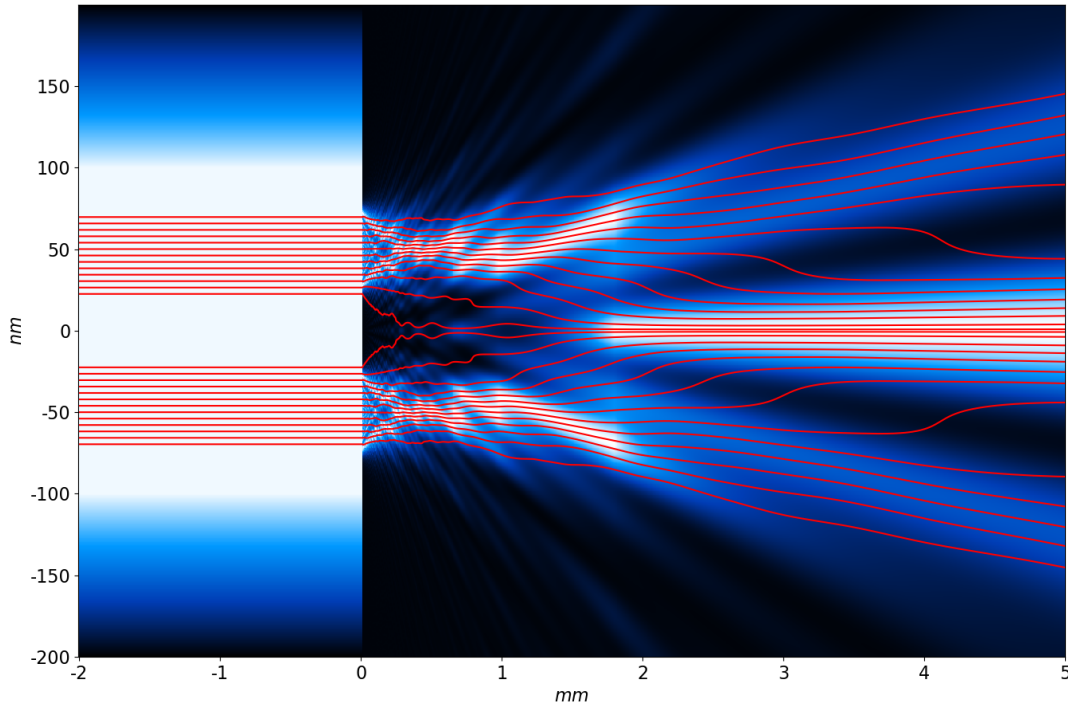


FIGURE 8 – En rouge, 26 trajectoires du centre de masse d’une molécule de  $C_{60}$  à partir de 26 positions initiales différentes. Les trajectoires des molécules arrêtées par la plaque percée ne sont pas représentées. En blanc et bleu, la norme de la fonction d’onde externe.

précisément, à chaque instant, la fonction d’onde externe définit un champ de vitesses et il suffit donc de connaître la position initiale du centre de masse pour déterminer sa trajectoire. La fonction d’onde externe est donc l’onde pilote définie en 1927 par Louis de Broglie et retrouvée par Bohm en 1952. La figure 8 donne les trajectoires du centre de masse d’un fullerene à partir de 26 positions initiales différentes à la sortie de la source des  $C_{60}$ .

On observe dans la figure 9 la convergence des 26 trajectoires de la figure 8 quand  $\hbar$  tend vers 0. Ces trajectoires deviennent rectilignes et convergent vers les trajectoires de Newton de la mécanique classique.

La fonction d’onde interne correspond au corpuscule quantique et c’est la position de son impact que l’on mesure sur l’écran de détection. Cette **position est une variable locale**. Par contre, **la fonction d’onde externe est non mesurable et non locale**. C’est elle, comme nous l’avons montré, qui correspond à la **variable cachée non locale** qui permet d’expliquer les inégalités de Bell et l’expérience EPR-B [24].

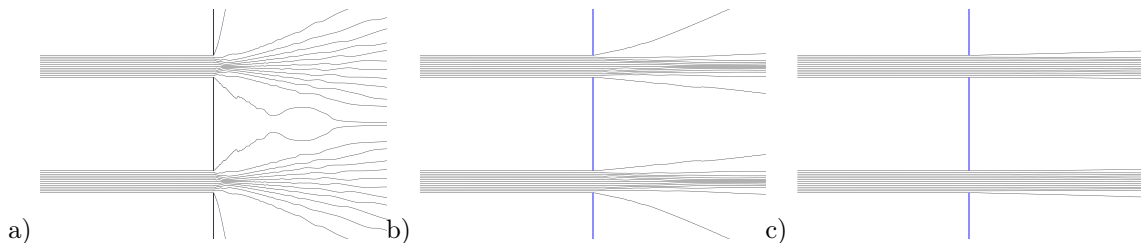


FIGURE 9 – Simulation de la convergence lorsque  $\hbar$  tend vers 0 (ou de façon équivalente lorsque la masse  $m$  augmente) de 26 trajectoires du centre de masse d’une molécule de  $C_{60}$  à partir de 26 conditions initiales différentes respectivement pour  $\hbar/10$  (ou  $m \times 10$ ) pour a);  $\hbar/100$  (ou  $m \times 10$ ) pour b);  $\hbar/1000$  (ou  $m \times 10$ ) pour c).

Par rapport à la seule fonction d’onde externe utilisée dans l’interprétation de Copenhague, la théorie de la double échelle ajoute une réalité sous-jacente, l’existence du corpuscule par la fonction d’onde interne ainsi que la position du centre de masse de ce corpuscule qui fait le lien entre ces deux

fonctions d'onde.

La position initiale du centre de masse s'obtient à partir de la fonction d'onde interne initiale. Cependant ni l'une ni l'autre ne sont connaissable par l'observateur avant une mesure (destructive). Il subsiste donc un aléa de préparation indépassable, la source d'émission n'étant pas ponctuelle. On a remplacé l'aléa de mesure (de l'interprétation de Copenhague) par un aléa de préparation.

## EN HOMMAGE A GEORGES LOCHAK

Nous tenons à rendre hommage à Georges Lochak, qui à travers *La Fondation de Broglie* et par ces propres travaux, a réussi à maintenir et développer la flamme allumée par Louis de Broglie sur la recherche des fondements de la mécanique quantique. Georges Lochak a été l'un des plus fidèles disciples de Louis de Broglie et a suivi, un peu contre tous, sa demande de ne pas renoncer à la réalité physique et à la simplicité [10] :

**“Renoncer à chercher des liens de causalité unissant les phénomènes décelables me paraît ne pouvoir être qu'une attitude provisoire... L'on doit toujours penser qu'un nouvel effort nous permettra, un jour ou l'autre, de pénétrer davantage dans l'analyse détaillée des liaisons causales qui assurent la succession des phénomènes physiques [...]**

**L'espace des configurations d'un système, l'extension en phase, l'espace de Hilbert, etc. Assurément, ce sont là des auxiliaires des raisonnements fort utiles et parfois même indispensables. Mais on ne doit jamais oublier que ces représentations abstraites n'ont aucune réalité physique. Seul a une réalité physique le déplacement d'éléments localisés dans l'espace au cours du temps.”**

Louis de Broglie, qui a été notre guide depuis de longues années, croyait en l'avenir dont il avait fait la devise de la Fondation. Il aura en 1966 [9] dans une interrogation prophétique une grande lucidité sur sa direction de recherche et le regard de l'Histoire:

**“L'avenir, un avenir que je ne verrai sans doute pas, tranchera peut-être la question: il dira si mon point de vue actuel est l'erreur d'un homme déjà assez âgé qui reste attaché aux idées de sa jeunesse ou, au contraire, s'il traduit la clairvoyance d'un chercheur qui a réfléchi pendant toute sa vie sur le problème le plus fondamental de la physique contemporaine.”**

## References

- [1] J. Baudon and J. Robert. *Interférométrie atomique*. Diff Sciences, 2004.
- [2] J. F. Champollion. Lettre à m. dacier, secrétaire perpétuel de l'académie royale des inscriptions et belles-lettres, relative à l'alphabet des hiéroglyphes phonétiques employés par les égyptiens, 1822.
- [3] J.-J. Champollion, Jean-François et Champollion. *L'Aventure du déchiffrement des hiéroglyphes - Correspondance de Jean-François et Jacques-Joseph Champollion*. Les Belles Lettres, 2021. choisie et présentée par Karine Madrigal.
- [4] C. Cohen-Tannoudji, B. Diu, and F. Laloë. *Quantum mechanics*. Quantum Mechanics. Wiley, 1977.
- [5] L. de Broglie. Ondes et quanta. In *C. R. Acad. Sci. t.177*, pages 507–510. Gauthier-Villard, 1923.
- [6] L. de Broglie. La mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière et du rayonnement. *Journal de physique*, 8:225–241, 1927.
- [7] L. de Broglie. *Une tentative d'interprétation causale et non linéaire de la mécanique ondulatoire : La théorie de la double solution*. Gauthier-Villars, 1956. English translation in [8].
- [8] L. de Broglie. *Non-linear wave mechanics. A causal interpretation*. Elsevier Pub. Co., 1960.
- [9] L. de Broglie. *Certitudes et incertitudes de la science*. Albin Michel, Paris, France, 1966.
- [10] L. de Broglie. Réflexions sur la causalité. *Ann. Fond. Louis de Broglie*, 2(2):69–72, 1977.
- [11] L. de Broglie and J. Andrade e Silva. *La réinterprétation de la mécanique ondulatoire*. Gauthier-Villars, 1971.
- [12] A. Einstein. Elementare Überlegungen zur Interpretation der Grundlagen der Quanten-Mechanik. *Scientific Papers presented to Max Born, Olivier and Boyd; trad. fr. in A. Einstein, Œuvres choisies 1, Quanta, Seuil et CNRS, 1989.*, 368(5):409–547, October 1953.

- [13] A. Faure. *Champollion, le savant déchiffré*. Fayard, 2020.
- [14] R. Feynman and A. Hibbs. *Quantum Mechanics and Paths Integrals*. McGraw-Hill, 1965.
- [15] R. P. Feynman, R. B. Leighton, and M. Sands.
- [16] M. Gondran. Analyse MinPlus. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 323:371–375, 1996.
- [17] M. Gondran. Schrödinger Equation and Minplus Complex Analysis. *Russian Journal of Mathematical Physics*, 11(2):130–139, 2004.
- [18] M. Gondran, M. Božić, D. Arsenović, and A. Gondran. Proposed Experiment with Rydberg Atoms to Study the Influence of Particle Size on Quantum Interference. *Acta Physica Polonica A*, 112(5):805, November 2007. <http://dx.doi.org/10.12693/APhysPolA.112.805>.
- [19] M. Gondran and A. Gondran. A complete analysis of the Stern-Gerlach experiment using Pauli spinors, 2005. arXiv: quant-ph/051276.
- [20] M. Gondran and A. Gondran. Numerical simulation of the double slit interference with ultracold atoms. *American Journal of Physics*, 73(6):507–515, 2005. arXiv:0712.0841.
- [21] M. Gondran and A. Gondran. Energy flow lines and the spot of Poisson–Arago. *American Journal of Physics*, 78(6):598–602, 2010.
- [22] M. Gondran and A. Gondran. A synthetic interpretation: the double-preparation theory. *Physica Scripta*, T163:014029, Dec. 2014. hal-01109005.
- [23] M. Gondran and A. Gondran. *Mécanique Quantique : Et si Einstein et de Broglie avaient aussi raison ?* Editions Matériologiques, 2014.
- [24] M. Gondran and A. Gondran. Replacing the Singlet Spinor of the EPR-B Experiment in the Configuration Space with Two Single-Particle Spinors in Physical Space. *Foundations of Physics*, 46(9):1109–1126, 2016. arXiv:1504.04227.
- [25] M. Gondran and A. Gondran. Expérience de fentes asymétriques pour tester l’interprétation de la fonction d’onde, 2022. en soumission.
- [26] M. Gondran and A. Gondran. Théorie de la double échelle et gravitation quantique, 2022. en préparation.
- [27] M. Gondran, A. Gondran, and C. Noûs. The two-scale interpretation: de broglie and schrödinger’s external and internal wave functions. *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, 46(1):87–126, 2021.
- [28] A. Kenoufi, M. Gondran, and A. Gondran. Semi-Classical Limit and Least Action Principle Revisited with  $(\min,+)$  Path Integral and Action-Particle Duality. *Russian Journal of Mathematical Physics*, 27(1):61–75, 2020.
- [29] F. Laloë. *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?* EDP Sciences, 2011.
- [30] S. Laurent. Les étapes du déchiffrement des hiéroglyphes. <https://www.mondedelabile.com/les-etapes-du-dechiffrement-des-hieroglyphes/>, 2009. Le monde de la Bible; Accessed: 2022-04-22.
- [31] V. Maslov. *Analyse Idempotente*. Edition Mir, 1989.
- [32] O. Nairz, M. Arndt, and A. Zeilinger. Experimental challenges in fullerene interferometry. *Journal of Modern Optics*, 47(14-15):2811–2821, 2000.
- [33] E. Schrödinger. Der stetige Übergang von der Mikro-zur Makromechanik. *Naturwissenschaften*, 14:664–666, 1926.
- [34] V.P. Maslov and S. Samborskii. *Idempotent Analysis*. Advances in Soviet Mathematics 13, American Mathematical Society, 1992.
- [35] T. Young. The Bakerian Lecture. On the Theory of Light and Colors. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 92:12–48, 1802.