

Rapport sur l'Expérience à choix retardé de Wheeler sur Ordinateur Quantique

Théotim Barbier

7 mars 2025

Résumé

Ce rapport se base sur l'article original de Chandarana et al. [1].

1 Introduction

La mécanique quantique est encore de nos jours quelque chose qui n'est pas très intuitif. Parmi les expériences étonnantes sur celle-ci, on retrouve les expériences à choix retardés. En général, ces expériences proposent un schéma dans lequel un choix est effectué a posteriori d'un phénomène quantique. Ces expériences peuvent être déroutantes à premier abord car elles semblent suggérer un principe de rétroaction de la mécanique quantique, c'est à dire que le choix semble avoir un effet sur le passé. Il existe différentes expériences de choix retardé comme la gomme quantique ou encore l'expérience de Wheeler. Dans ce rapport, nous allons explorer l'expérience à choix retardé de Wheeler. Cela nous permettra d'observer la dualité onde-corpuscule des photons, ainsi que l'absence de variable cachée locale. De plus, l'article [1] propose une modélisation de cette expérience dans une machine quantique que nous essayons de reproduire.

2 Expérience à choix retardé de Wheeler

2.1 Description de l'Expérience

L'expérience repose sur un interféromètre de Mach-Zehnder et se déroule comme suit :

1. Un photon unique est émis et rencontre un premier miroir semi-réfléchissant (BS1), qui divise son trajet en deux chemins possibles.
2. Les faisceaux réfléchis et transmis sont ensuite redirigés par deux miroirs (M1 et M2).
3. Un deuxième miroir semi-réfléchissant (BS2) peut être placé ou non avant que le photon atteigne les détecteurs D1 et D2.
4. Le choix d'ajouter ou non BS2 est fait après que le photon a passé BS1, ce qui signifie que son comportement (onde ou particule) semble être déterminé rétroactivement.

2.2 Résultats et Interprétation

Comportement ondulatoire

Lorsque BS2 est présent, les deux chemins interfèrent, et le photon montre un comportement ondulatoire en produisant un motif d'interférence détecté uniquement dans l'un des détecteurs.

Comportement corpusculaire

Si BS2 est absent, l'interférence disparaît et le photon est détecté sur l'un des chemins, ce qui correspond à un comportement de particule.

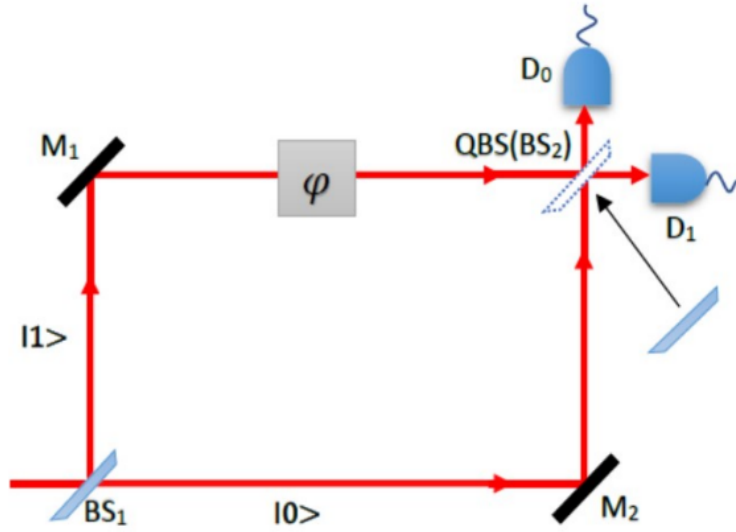


FIGURE 1 – Schéma simplifié de l'expérience de Wheeler. Image tiré de l'article [1].

2.3 Implications Fondamentales

L'expérience remet en question la notion classique de causalité. Si le choix de mesurer le photon affecte son comportement **a posteriori**, cela suggère que la réalité quantique ne suit pas une logique linéaire du temps. Parmi les interprétations possibles :

- L'interprétation de Copenhague : l'état du photon n'est défini qu'au moment de la mesure.
- La théorie des mondes multiples : chaque choix donne naissance à un univers distinct.
- La non-localité quantique : une connexion instantanée pourrait exister à travers l'univers.

Remarque : L'expérience de Wheeler a été étendue à un aspect cosmique où le choix de placer ou non BS2 est fait par une particule cosmique provenant à des années lumières. Cette expérience permet de démontrer l'absence de facteur locaux pouvant expliquer les propriétés observés.

3 Théorie

L'expérience du choix retardé quantique repose sur l'utilisation d'un interféromètre de Mach-Zehnder dont la configuration est contrôlée de manière quantique. L'article propose de représenter chacun des chemins possiblement pris par le photon par les état $|0\rangle$ et $|1\rangle$ d'un bit quantique.

3.1 Dualité onde-corpuscule

Dans un premier temps, l'article s'intéresse à l'utilisation d'un qubit superposé pour choisir l'utilisation du deuxième miroir semi-réfléchissant (BS2). Cette superposition va dépendre d'un paramètre α qui va jouer sur les poids entre l'état $|0\rangle$ et l'état $|1\rangle$. Voici comment est représenté l'expérience : Un photon, représenté par le qubit q_0 entrant dans l'interféromètre subit une transformation décrite par l'opérateur Hadamard H , qui agit comme un séparateur de faisceau :

$$H|0\rangle = \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}}.$$

Un déphaseur $P(\phi)$ introduit une phase relative ϕ dans l'un des chemins (ici état $|1\rangle$) :

$$P(\phi)|1\rangle = e^{i\phi}|1\rangle.$$

Si un second opérateur Hadamard est appliqué, l'état final devient :

$$|\psi_w\rangle = \cos(\phi/2)|0\rangle + \sin(\phi/2)|1\rangle.$$

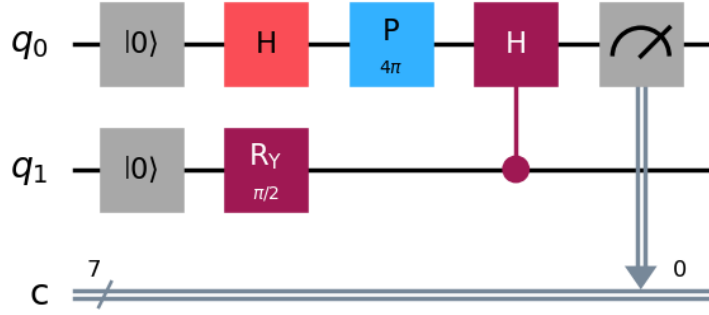


FIGURE 2 – Circuit quantique représentant l'expérience 1 pour $\phi = 4\pi$ et $\alpha = \pi/2$. L'opérateur P est l'opérateur de phase sur le qubit du système et l'opérateur R_Y est l'opérateur de rotation sur le qubit auxiliaire. Image tiré de mon code qiskit.

Si il n'est pas présent, on a :

$$|\psi_p\rangle = \frac{1}{2}(|0\rangle + e^{i\phi}|1\rangle).$$

Dans le cadre quantique, la présence ou l'absence du second séparateur de faisceau est contrôlée par le qubit auxiliaire q_1 en superposition :

$$|\psi_f\rangle = \cos \alpha |\psi_p\rangle |0\rangle_a + \sin \alpha |\psi_w\rangle |1\rangle_a.$$

où 'a' correspond au bit auxiliaire. Au final, l'article montre que les intensités détectés aux détecteurs sont alors :

$$E_{D_0} = \frac{\cos^2 \alpha}{2} + \sin^2 \alpha \cos^2(\phi/2), \quad (1)$$

$$E_{D_1} = \frac{\cos^2 \alpha}{2} + \sin^2 \alpha \sin^2(\phi/2). \quad (2)$$

Lorsque $\alpha = 0$, BS2 n'est pas présent et l'état suit un comportement corpusculaire, tandis que pour $\alpha = \pi/2$, BS2 est présent et on observe une interférence caractéristique d'un comportement ondulatoire. Cela met en évidence la dualité entre les deux natures en fonction de la superposition du contrôle quantique. Le circuit quantique associé est présenté figure 2.

3.2 Absence de variable caché non-locale

L'expérience est étendue à un système impliquant système intriqué de qubits auxiliaire, qui représente une séparation spatiale entre les événements. Dans cette expérience, on ajoute donc 1 deuxième qubit auxiliaire q_2 qui va être intriqué avec le premier dans un état $|EPR\rangle$. De plus, la rotation selon α sera maintenant effectué sur q_2 est non q_1 . Le circuit est donné figure 3

En utilisant la théorie quantique, l'état global est donné par :

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} [\cos \alpha |\psi_p\rangle |0\rangle + \sin \alpha |\psi_w\rangle |1\rangle] \otimes |0\rangle.$$

L'article montre que les intensités attendues aux détecteurs sont alors :

$$E_{D_0} = \frac{\cos^2 \alpha}{4} + \frac{\sin^2 \alpha}{2} \cos^2(\phi/2), \quad (3)$$

$$E_{D_1} = \frac{\sin^2 \alpha}{4} + \frac{\cos^2 \alpha}{2} \cos^2(\phi/2). \quad (4)$$

Les modèles à variables cachées locales supposent que la rotation du qubit auxiliaire q_2 est indépendante de la mesure de q_0 finale et dépend d'une variable caché. Ainsi, l'énergie observé ne

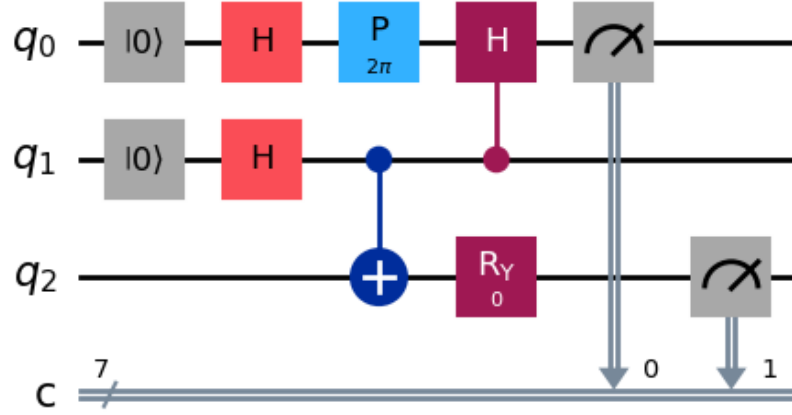


FIGURE 3 – Circuit quantique représentant l'expérience 2. L'opérateur P représente l'opérateur de phase sur le qubit du système et l'opérateur R_Y représente la rotation effectuée sur le deuxième qubit ancillaire. Image tirée de mon code qiskit.

devrait pas dépendre de α . En effet, pour le calcul de l'énergie sous des hypothèses déterministe d'une variable cachée locale, l'article montre que les énergies valent :

$$E_{D_1} = E_{D_0} = \frac{1}{4} + \frac{\cos^2(\phi/2)}{2}$$

4 Expérimentation et Résultats

Dans cette partie, je vais présenter à la fois les résultats de l'article mais également les résultats que j'ai pu refaire par moi-même. Les expériences de l'article ont été conduites sur les ordinateurs quantiques IBM 'ibmq 5 tenerife' et 'ibmq 16 melbourne' en utilisant la librairie Qiskit. Mes résultats ont été testés sur simulateur et machines quantiques IBM en utilisant Qiskit.

4.1 Expérience 1

Cette expérience a pour but de montrer l'influence de la présence ou non de la deuxième porte quantique. Le but va être de comparer l'énergie mesurée expérimentalement à celle calculée avec la théorie quantique. Mes résultats pour $\alpha = \{0, \pi/2, \pi/4\}$ avec une machine IBM sont disponibles dans la figure 4. On remarque que les résultats suivent bien l'énergie calculée à l'équation (1). En effet, si $\alpha = 0$ on retrouve bien un comportement corpusculaire où le photon a une chance sur 2 d'être détecté par D_0 (i.e la mesure finale est l'état $|0\rangle$). La valeur n'est pas toujours égale à 0.5 à cause des erreurs commises par les machines quantiques actuelles. Si $\alpha = \pi/2$, on retrouve également un comportement ondulatoire. Ici aussi, on remarque que les valeurs ne sont pas parfaites, notamment sur les pics qui n'atteignent jamais 0 ou 1 comme un vrai sinus. Enfin, pour $\alpha = \pi/4$, on retrouve un comportement entre la sinus et la constante. Cette expérience montre bien la véracité de la théorie vue précédemment.

L'article [1] propose des résultats plus complets avec une comparaison entre l'expérience et la théorie pour plus de valeurs de α , disponible dans la figure 5. On remarque encore une fois que les valeurs expérimentales semblent bien vérifier la théorie.

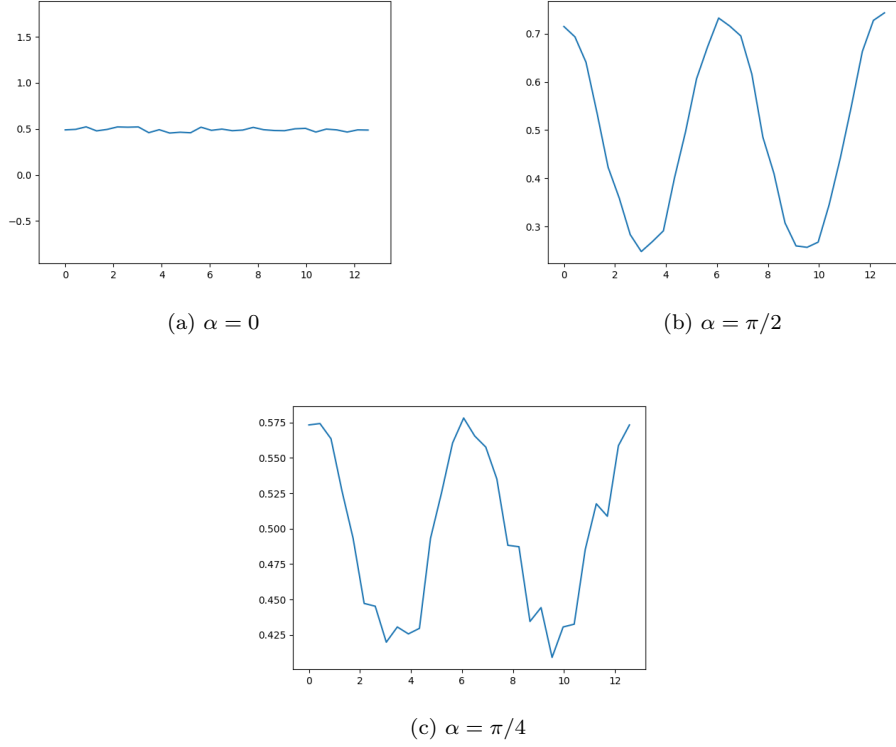


FIGURE 4 – Résultats de l'expérience 1 sur ordinateur quantique. On retrouve en abscisse les valeurs de ϕ de 0 à 4π et en ordonnée les valeurs de l'énergie (i.e la probabilité d'être observé sur le détecteur D_0).

4.2 Expérience 2

Pour l'expérience 2, on reprends le circuit de la figure 3. Si l'on considère l'existence d'une variable caché local, l'énergie ne dépend pas de α est vaut toujours, les valeurs indiquées en figure 6. Pour ma part, j'ai testé pour $\alpha = 0$ et mes résultats expérimentaux et ceux de l'article sont disponibles figure 7. On remarque directement que mes résultats ou ceux de l'article ne corroborent absolument pas avec la théorie d'une variable caché locale où les valeurs d'énergies devraient être égales en D_0 et D_1 . Cela permet donc de prouver une fois de plus l'absence de variable caché locale dans la théorie quantique.

5 Conclusion

L'expérience conduite dans l'article confirme la validité de la théorie quantique dans l'expérience à choix retardé quantique de Wheeler et met en évidence la nature fondamentalement non déterministe de la mécanique quantique.

Références

- [1] Pranav D Chandarana, Angela Anna Baiju, Sumit Mukherjee, Antariksha Das, Narendra N Hegade, and Prasanta K Panigrahi. Demonstration of quantum delayed-choice experiment on a quantum computer. *arXiv preprint arXiv :2004.04625*, 2020.

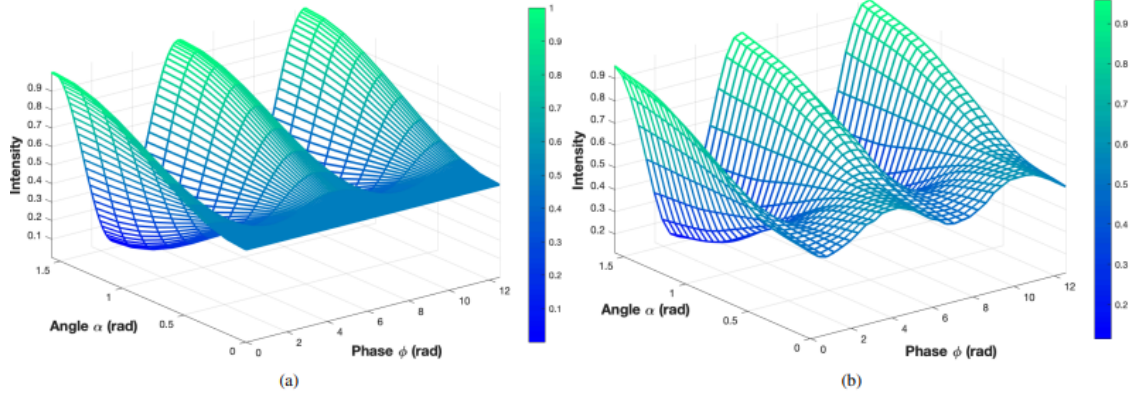


FIGURE 5 – Comparaisons des résultats théoriques et expérimentaux pour l'expérience 1. (a) présente les résultats théorique selon l'équation (1). (b) présente les résultats expérimentaux de l'article pour différentes valeurs de α et ϕ .

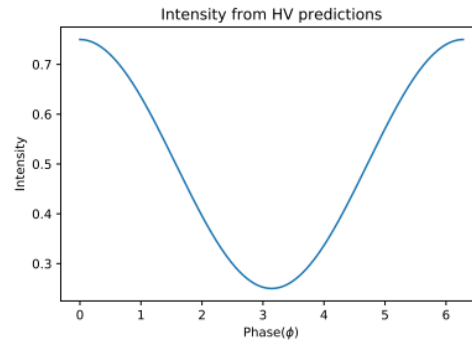


FIGURE 6 – Valeur de l'intensité pour la deuxième expérience dans le contexte d'une variable caché locale.

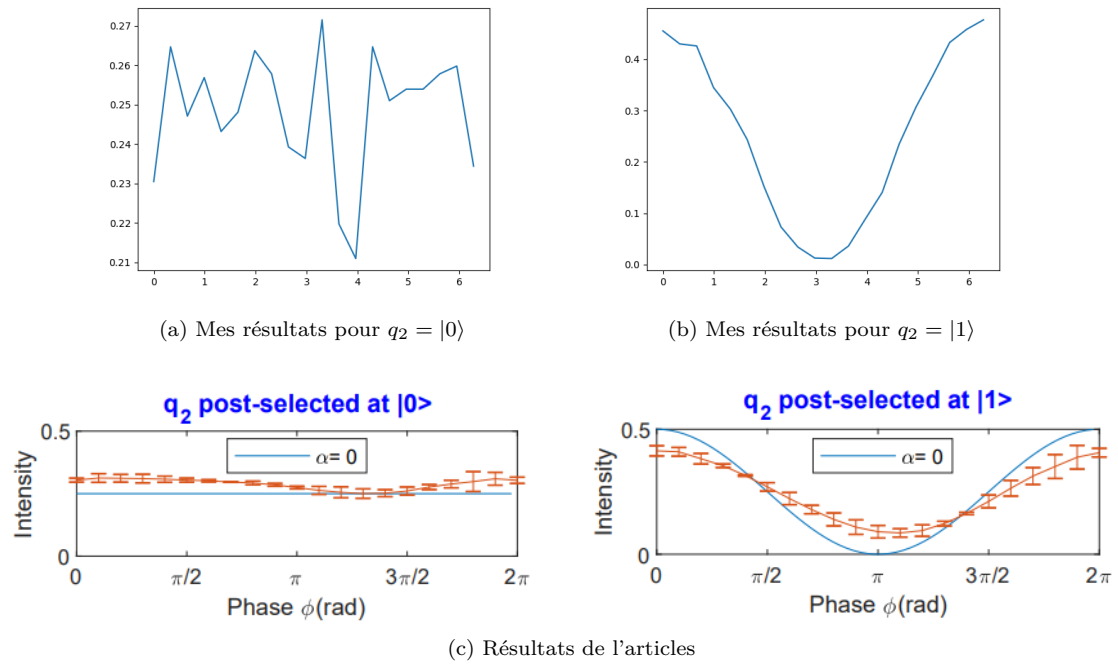


FIGURE 7 – Résultats de l'expérience 2 pour $\alpha = 0$ effectué sur ordinateur quantique. On retrouve en abscisse les valeurs de ϕ de 0 à 2π et en ordonnée les valeurs de l'énergie (i.e la probabilité d'être observé sur le détecteur D_0). Les figures (a) et (b) présentent mes résultats expérimentaux. La figure (c) présente les résultats expérimentaux (en rouge) et théorique (en bleu) de l'article.