

Test de reproductibilité de l’algorithme de Grover sur simulateur et sur machines quantiques IBM

Benjamin Antunes¹, Claude Mazel¹, Philippe Lacomme¹, David Hill¹

¹LIMOS – CNRS UMR 6158

Clermont-Auvergne-INP, Mines de Saint-Étienne, Université Clermont-Auvergne
ISIMA, 1 rue de la Chebarde, F-63178, AUBIERE Cedex, France
{benjamin.antunes, claud.mazel, philippe.lacomme, david.hill}@uca.fr

Mots-clés : *Reproducible Research, Quantum computing.*

1 Introduction

Dans le domaine de l’informatique quantique, des algorithmes tels que celui de Grover offrent un aperçu du potentiel des systèmes quantiques pour traiter les informations de manière fondamentalement différente des ordinateurs classiques. L’algorithme de Grover, en particulier, est connu pour sa capacité à rechercher dans des bases de données non triées de manière quadratiquement plus rapide que ses homologues classiques [1], ce qui représente un bond significatif en efficacité de calcul. L’informatique quantique exploite les propriétés uniques de la mécanique quantique, telles que la superposition et l’intrication, pour effectuer des calculs [2]. Ce changement de paradigme par rapport à l’informatique classique ouvre de nouvelles frontières dans divers domaines. Si la cryptographie a des enjeux considérables, l’optimisation et la recherche opérationnelle en générale n’est pas en reste. Nous avons retenu l’algorithme de Grover comme point de repère pour évaluer les possibilités des machines quantiques mises gracieusement à la disposition de la recherche par IBM. L’informatique quantique fait face à de très nombreux défis pratiques. Entre autres, obtenir les mêmes conclusions scientifiques est un pilier épistémologique pour l’avancement de la Science. Différentes expériences quantiques identiques doivent donner des résultats statistiquement similaires (alors que l’on peut attendre une répétabilité bit à bit pour les calculateurs digitaux, cette dernière étant d’ailleurs essentielle pour déboguer les programmes). Il est possible de tester cette reproductibilité sur différentes plateformes et environnements. Notre papier vise à continuer une étude empirique débutée en 2019 sur le potentiel de reproductibilité des résultats l’algorithme de Grover sur différentes machines IBM.

2 Méthode

Nous avons commencé par des implémentations de cet algorithme avec 3 qubits [3], et nous abordons maintenant une version à 5 qubits sur une nouvelle plateforme d’informatique quantique d’IBM proposant, depuis 2023, 127 qubits, ce qui est assez exceptionnel. Nous cherchons à comparer la reproductibilité de ces algorithmes dans des environnements quantiques simulés et réels. Cette comparaison sert non seulement à mettre en lumière l’état actuel du matériel informatique quantique dont nous pouvons disposer, mais elle nous éclaire aussi sur les défis potentiels qui sont encore devant nous pour réaliser un calcul quantique fiable en pratique. Nous présentons sommairement les 2 versions de l’algorithme qui ont été testées (3 et 5 qubits). La version plus complexe à 5 qubits nécessite en fait 10 qubits en raison des contrôles et exigences des portes quantiques retenues. Dans un premier temps,

nous avons exécuté les deux versions de l'algorithme de Grover sur un simulateur de machine quantique fourni par IBM en lien avec ses machines 'physiques'. Cet environnement de simulation est conçu pour imiter les opérations d'un ordinateur quantique sans les contraintes physiques et les interactions environnementales du matériel quantique réel. Dans un second temps, les mêmes algorithmes ont été exécutés sur une vraie machine quantique disponible sur la plateforme IBM. Nous avons exécuté les deux implémentations de Grover sur la plus grande machine quantique d'IBM disponible au public, Brisbane, avec 127 qubits. Nous avons réalisé environ 20 répliques pour chaque expérience. Pour l'implémentation à 3 qubits, nous avons également utilisé une machine plus petite et plus ancienne avec 7 qubits. Le principal indicateur d'intérêt était la fréquence à laquelle l'algorithme identifiait correctement l'état cible (sur 1024 « shots », le réglage par défaut pour les machines quantiques IBM).

3 Résultats et perspectives

Notre étude empirique sur la reproductibilité de l'algorithme de Grover dans les environnements informatiques quantiques révèle des disparités significatives entre les simulations et les résultats des machines quantiques [4]. Ces différences dépendent du nombre de qubits et du nombre de portes utilisés dans le circuit. Les résultats simulés pour la version à 5 qubits de l'algorithme de Grover donnent une probabilité de 25% d'identifier l'état 00101. Il faut noter que l'Oracle utilisé utilise très peu de qubit par rapport aux nombres de qubits nécessaires pour un TSP ou un problème SAT. Le circuit utilisé pour l'algorithme de Grover 5 qubits est illustré dans la Figure (1).

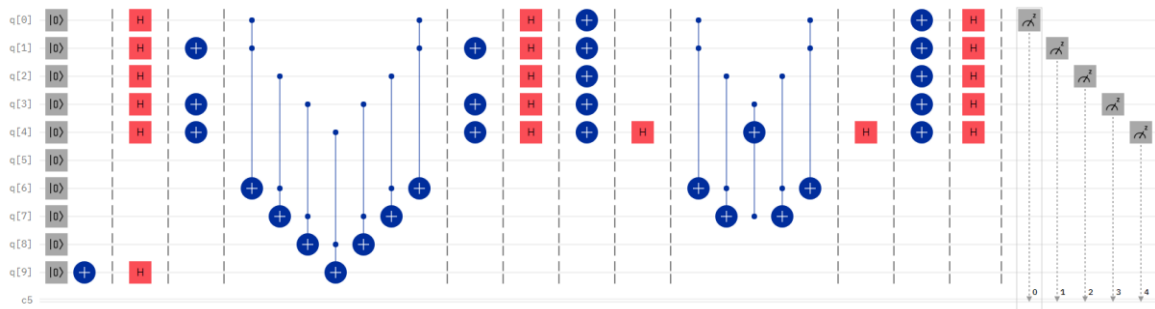


FIG. 1 – Circuit Grover 5 qubits

Cependant, lorsque cet algorithme a été implémenté les machines IBM, la performance a largement divergé, résultant en une distribution presque uniforme comme le montre la Figure (2).

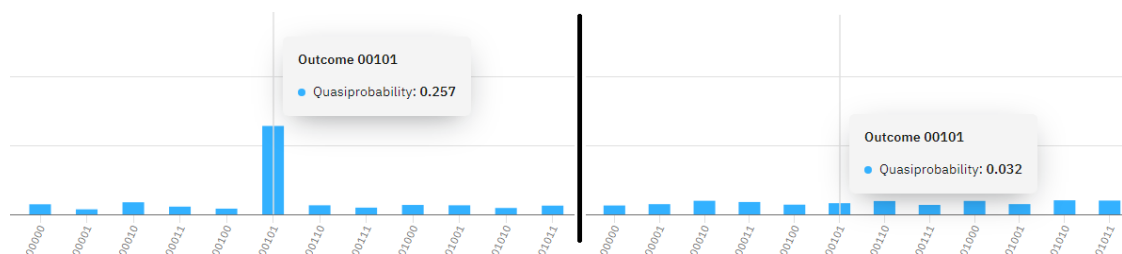


FIG. 2 – Résultat Grover 5 qubits sur simulateur VS sur machine réelle (Brisbane 127 qubits)

Pour l'implémentation à 3 qubits, alors que le simulateur donne une probabilité de 95% d'obtenir l'état marqué par l'Oracle, l'exécution sur les machines à 7 ou à 127 qubits donne un résultat compris entre 60% et 70%, comme montré sur la Figure (3).

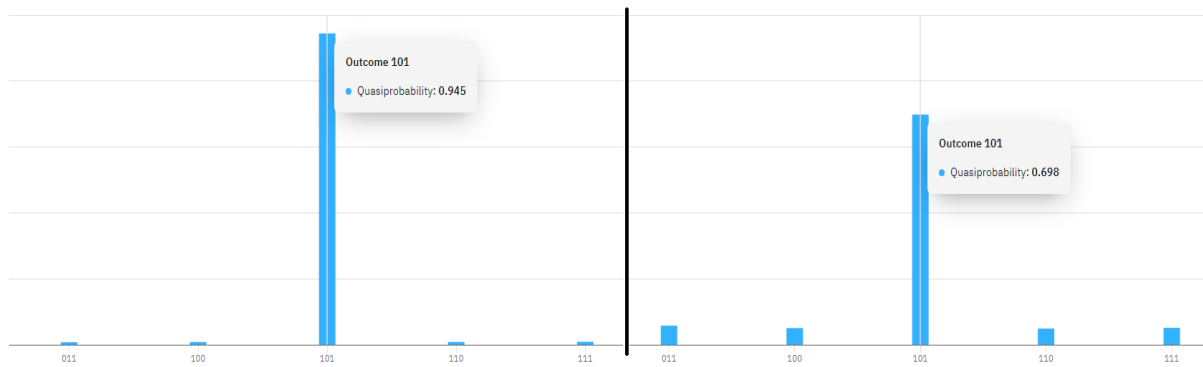


FIG. 3 – Résultat Grover 3 qubits sur simulateur VS sur machine réelle (Brisbane 127 qubits)

Les différences entre l'implémentation sur 3 et 5 qubits viennent des bruits et du taux d'erreur des différentes portes. Nous constatons par exemple que l'intervalle des taux d'erreurs sur la porte Pauli-X varie de 0.09 à $8.730e-4$ selon les qubits de la machine 127 qubits. Ces taux d'erreurs ne sont pas fixes et peuvent varier selon les jours. Cependant, concernant l'algorithme de Grover à 3 qubits, nous observons une amélioration notable des performances par rapport à nos travaux précédents [5]. Dans cette étude antérieure, l'exécution de l'algorithme de Grover à 3 qubits sur diverses machines à 7 qubits donnait des résultats très éloignées des résultats théoriques. Cela suggère que la précision des machines actuellement disponibles s'est améliorée par rapport à celles qui étaient mises à notre disposition il y a un an. L'étude comparative de l'algorithme de Grover dans les environnements de calcul quantique simulés et réels révèle des défis techniques auxquels les différents constructeurs sont confrontés. Compte tenu de ces limitations, les recherches actuelles utilisent essentiellement les simulateurs quantiques dans lesquels on ajoute parfois des modèles de simulation de bruits.

Différentes technologies sont en compétitions pour 'fabriquer' des qubits 'parfaits' et il n'est pas surprenant de trouver que les résultats sur machines réelles ne soient pas aussi bons que nous pourrions l'espérer via les simulateurs. IBM fait partie des seuls constructeurs à permettre l'utilisation en ligne de vraies machines quantiques et elles sont opérationnelles sur bien des problèmes. Les simulateurs permettent dès à présent aux chercheurs de se former à l'informatique quantique. Nous espérons que dans un futur proche, les évolutions technologiques permettront aux machines quantiques d'atteindre la fiabilité requise pour réaliser une recherche applicable et reproductible.

References

- [1] Lov K Grover. A fast quantum mechanical algorithm for database search. In: Proceedings of the twenty-eighth annual ACM symposium on Theory of computing. 1996. p. 212-219.
- [2] Michael A Nielsen et Isaac L Chuang. Quantum computation and quantum information. Cambridge university press, 2010.
- [3] Thomas Cluzel, Claude Mazel et David RC Hill. Découverte de l'informatique quantique, état de l'art et tests sur machine IBM. Rapport de recherche. LIMOS, 2020, 63 p. <hal-04052636>
- [4] Aashish A Clerk, Michel H Devoret, Steven M Girvin, et al. Introduction to quantum noise, measurement, and amplification. *Reviews of Modern Physics*, 82(2) :1155, 2010.
- [5] David RC Hill, Benjamin A Antunes, Thomas Cluzel, et al. A few words about quantum computing, epistemology, repeatability and reproducibility. In: Quantum Operation Research EU/Meeting, Troyes (France), France, 2023, 5 p. <hal-04089148>