



## Combinatorial Optimization and Quantum Computers

---

Alexandre Gondran and Michel Gondran

EasyChair preprints are intended for rapid dissemination of research results and are integrated with the rest of EasyChair.

February 7, 2020

# Optimisation Combinatoire et le-s Ordinateurs Quantiques

Alexandre Gondran<sup>1</sup>

Michel Gondran<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *ÉNAC, École Nationale de l'Aviation Civile*, Toulouse, France

`alexandre.gondran@enac.fr`

<sup>2</sup> *AEIS, Académie Européenne Interdisciplinaire des Sciences*, Paris, France

`michel.gondran@polytechnique.fr`

**Mots-clés** : *calcul quantique, optimisation.*

L'informatique quantique et les *ordinateurs* quantiques prétendent depuis plus de vingt ans révolutionner la résolution des problèmes combinatoires. L'objet de cette exposé est d'abord de présenter un rapide état des lieux des différents modes de fonctionnement des ordinateurs quantiques. On verra que la plupart des calculateurs ne proposent que des résolutions approchées de problèmes d'optimisation sans aucune garantie d'optimalité. Les approches exactes sont quant à elles soumises à la nécessité d'utiliser un *code correcteur d'erreur* quantique rendant le passage à l'échelle difficile voir non réalisable en pratique. Enfin, nous montrerons que le phénomène de superposition quantique qui est à la base du qubit est sujet à des interprétations très différentes dans la communauté scientifique.

## 1 Simulateurs Quantiques

Il existe principalement deux types d'ordinateurs quantiques : ceux qui font de la simulation quantique et ceux qui utilisent des portes logiques, plus proche des ordinateurs classiques.

Dans les simulateurs, on trouve deux sous catégories : la première sous-catégorie sont les ordinateurs à la *Feynman* qui parlait en 1982 de construire "*a quantum machine that could imitate any quantum system, including the physical world.*" [1] Cette sous-catégorie correspond à des ordinateurs analogiques comme ceux qui existaient avant le numérique et qui sont très difficilement programmables ; un *ordinateur analogique* quantique est spécifiquement construit pour reproduire un phénomène complexe de physique réelle qui est impossible à simuler avec les super-calculateurs actuels. Par exemple, pour connaître la conductivité électrique ou le magnétisme d'un système formé de plus de quelques dizaines d'atomes. Évidement aucune garantie d'optimalité n'est donné quant à la configuration trouvée, chaque simulation peut donner des configurations différents mais c'est une des voies les plus prometteuses et déjà opérationnelles du calcul atomique et moléculaire (qui jusqu'à présent occupe une bonne partie du temps calcul des super-calculateurs en fonction).

La seconde sous-catégorie des simulateurs quantiques sont les *ordinateurs adiabatiques*, comme D-Wave, qui utilise principalement un algorithme de *recuit quantique*, variation quantique de la meta-heuristique de recuit simulé. Ces algorithmes effectuent donc un échantillonnage de l'espace des solutions. Outre le fait que la solution trouvée n'est qu'heuristique et donc sans garantie d'optimalité, les réalisations pratiques de telles ordinateurs comme D-Wave sont entourées de secret et ne permettent pas de montrer ce qui relève du quantique et simplement d'un recuit simulé tournant sur un super-calculateur dédié. Nombreux sont les scientifiques qui dénoncent la mystification commerciale et technologique de ce super-calculateur mi-quantique, mi-classique qui n'a pas encore fait ces preuves pratiques.

## 2 Calculateurs Quantiques

Cette seconde catégorie d'ordinateurs repose sur les concepts de qubits, généralisation quantique du bit classique ainsi que sur de portes logiques quantiques.

## 2.1 Calculateur quantique sans correcteur d'erreur

Récemment, Google a publié un article dans Nature [2] prétendant à la suprématie quantique de son ordinateur par rapport aux super-calculateurs classiques. À la lecture de l'article, on s'aperçoit que le problème traité utilise un circuit quantique (c-à-d une succession de portes logiques quantiques) sans se soucier des erreurs de code de chacune des portes. Le résultat est donc entaché d'un bruit aléatoire qui n'a peu d'importance pratique car le problème considéré ne prétend pas faire un calcul exact.

## 2.2 Calculateur quantique avec correcteur d'erreur

Les approches de résolution exactes d'algorithmes comme la décomposition en nombre premier sont quant à elles soumises à la nécessité d'utiliser un *code correcteur d'erreur* quantique rendant le passage à l'échelle difficile voir non réalisable en pratique. Nous verrons que le phénomène de décohérence n'est pas la seule cause de l'utilité de ces codes correcteurs mais que, plus fondamentalement, des hypothèses simplificatrices sur le qubit en sont également responsables. En effet, l'extension spatiale (le fait qu'un qubit n'est pas ponctuel) n'est pas pris en considération dans la modélisation du qubit en informatique quantique. Comme nous l'avons montré dans [3] cette extension spatiale est pourtant essentiel lorsque l'on souhaite déterminer l'évolution temporelle d'un qubit. Cette non prise en compte de l'extension spatiale peut expliquer la perte de cohérence de phase entre qubits intriqués et donc les erreurs dont sont responsable chaque porte quantique.

## 3 Autres problèmes théoriques fondamentaux

“Si les technologies pour réaliser le rêve de l'ordinateur quantique semblent d'une difficulté extraordinaire, aucune loi fondamentale de la physique n'interdit de les envisager” [4]. Cette citation de deux éminents physiciens du domaine de l'informatique quantique relève d'une interprétation partisane du phénomène de superposition quantique (l'interprétation de Copenhague). Or le débat sur l'interprétation de la superposition est toujours très actif parmi les physiciens et provient du problème appelé *problème de la mesure*, et plus connu sous le nom du paradoxe du chat de Schrödinger. Nous présenterons rapidement le débat et nous montrerons comment nous sommes amené à faire la distinction entre *qubit individuel* et *qubit statistique*. Un *qubit individuel* est un qubit implémenté physiquement par un unique atome (ou tous autre système unique à deux niveaux) tandis qu'un *qubit statistique* est implémenté physiquement par des milliers atomes. L'existence physique du *qubit individuel* est sujet à l'interprétation du phénomène et aucune expérience n'a pas encore permit de démontrer son existence. Par contre, l'existence physique du *qubit statistique* a déjà été prouvé [5] mais a également montré son impossibilité de passage à l'échelle (ordinateur avec de nombreux qubits).

## Références

- [1] R. Feynman. Simulating Physics with Computers. *International Journal of Theoretical Physics*, 21, 1982.
- [2] F. Arute et al. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature* 574, 505–510, 2019.
- [3] M. Gondran and A. Gondran. Spinor with Spatial Extension and Quantum Computer Feasibility. *AIP Conf. Proc.* 1446, 371–379, 2012.
- [4] M. Leduc and S. Tanzilli. Les technologies quantiques, de la recherche fondamentale à l'innovation. *Photoniques*, 91–24, 2018.
- [5] M.A. Nielsen and I. Chuang. Quantum Computation and Quantum Information. Cambridge University Press, 2000.