

# Comparaison des machines de type "recuit simulé quantique" et des machines numériques

Samuel Deleplanque<sup>1</sup> et Philippe Lacomme<sup>2</sup>

<sup>1</sup> IEMN UMR CNRS 8520, Centrale Lille, JUNIA, Univ. Lille, Univ. Valenciennes, France

[samuel.deleplanque@junia.com](mailto:samuel.deleplanque@junia.com)

<sup>2</sup> Université Clermont Auvergne, LIMOS UMR CNRS 6158, 63178 Aubière Cedex, France

[philippe.lacomme@isima.fr](mailto:philippe.lacomme@isima.fr)

*Mots-clés : Machines quantiques*

## 1 Introduction

Depuis quelques années on voit apparaître plusieurs technologies pour les machines quantiques avec des caractéristiques très différentes. On peut distinguer les machines analogiques de type D-Wave qui offrent actuellement des milliers de qubits et les machines "généralistes" telles que celles proposées par IBM ou encore les machines programmables à atomes froids de Pasqal qui en proposent aujourd'hui une centaine.

Bien que le processus exécuté est adiabatique, les machines D-Wave ne sont pas universelles. Elles ne sont capables de manipuler qu'un sous-ensemble de problèmes. Ces derniers correspondent aux modèles ISING du fait du hardware basé sur les verres de spin. Ces modèles sont quadratiques.

Les modèles qui doivent être fournis à ces machines sont donc des modèles ISING mais ils peuvent aussi directement être formulés sous la forme de QUBO (Quadratic Unconstrained Binary Optimization) c'est-à-dire des modèles quadratiques binaires non contraints tels qu'on les manipule depuis longtemps en optimisation.

Le processus adiabatique ne garantit pas de trouver la solution optimale et ces machines analogiques exécutent une métaheuristique de type Recuit Quantique reprenant les principes du Recuit Simulé (Kirkpatrick, 1983). En théorie, l'exploration de l'espace basée sur les fluctuations quantiques est plus efficace que l'exploration de l'espace de recherche basée sur les variations de température (Kadowaki, 1998).

## 2 Expérimentation

De nombreuses différences sont à relever dont celles concernant l'intrication. Dans les machines universelles, deux qubits peuvent être intriqués en appliquant un jeu de portes basées sur celle d'Hadamard et la porte CNOT afin d'atteindre un des 4 états de Bell selon les 4 possibilités d'initialisation des deux qubits. L'intrication est ici appliquée au sens strict. Par exemple si les paires (q1, q2) et (q2, q3) ont leurs qubits intriqués de façon à ce que la mesure de q1 et q2 donne des valeurs différentes, ainsi que pour q2 et q3, alors il sera impossible que q1 soit différent de q3. Dans les machines réalisées par D-Wave, le processus est différent : l'intrication n'est ici qu'une affaire de probabilité, et le couple (q1, q3) n'aura qu'une forte chance d'avoir ses éléments égaux sans que ce soit certain, et il sera même possible d'ajouter l' « intrication » de (q1, q3) au modèle.

Les deux principales difficultés dans l'utilisation de ces machines D-Wave résident dans :

- l'écriture du QUBO correspondant au problème et au nécessaire paramétrage des poids associés aux contraintes relaxées dans la fonction Objectif ;
- la prise en compte des limitations matérielles des machines (le graphe des qubits est loin d'être complet puisque le degré des sommets de la machine la plus puissante étant de 15).

Ces différences limitent le nombre d'opérations réalisables si on les considère sous forme de circuits quantiques. L'algorithme de Grover par exemple ou encore l'algorithme de Shor ne peuvent pas être exécutés directement sur ces machines. En effet un jeu de portes universelles permet de manipuler un ensemble de systèmes bien plus important.

Nous montrons sur un exemple de résolution du SAT les différences de modélisation et de résolution.

## 3 References

Kirkpatrick, S., Gelatt Jr, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *science*, 220(4598), 671-680.

Kadowaki, T., & Nishimori, H. (1998). Quantum annealing in the transverse Ising model. *Physical Review E*, 58(5), 5355. Kadowaki, T., & Nishimori, H. (1998). Quantum annealing in the transverse Ising model. *Physical Review E*, 58(5), 5355.