

Titre Thèse	Résolution de problèmes d'optimisation difficiles par le calcul quantique.	
(Co)-Directeur	Philippe Lacomme	E-mail : philippe.lacomme@isima.fr
(Co)-Directrice	Isabelle Lefebvre	E-mail : isabelle.lefebvre@junia.com
(Co)-Encadrant (s)	Samuel Deleplanque	E-mail : samuel.deleplanque@junia.com
Laboratoire(s)	LIMOS IEMN	Web : https://limos.fr/ https://www.iemn.fr/
Groupe(s)	Acoustique	Web : https://www.iemn.fr/la-recherche/les-groupes/groupe-acoustique
Financement acquis ?	Oui <input type="checkbox"/>	Non <input checked="" type="checkbox"/>
	Origine :	
Financement demandé	Contrat Doctoral <input type="checkbox"/>	Etablissement porteur : Univ. Lille <input type="checkbox"/> Centrale Lille <input type="checkbox"/> JUNIA <input checked="" type="checkbox"/>
	Région <input checked="" type="checkbox"/>	Co-financement acquis : Oui <input type="checkbox"/> Non <input checked="" type="checkbox"/> Préciser son origine (qu'il soit acquis ou non) :
	Autre : La société ACTEOS à Roubaix souhaite s'investir à hauteur de 25% du coût de la thèse.	

Résumé :

Bien des personnes associent l'ordinateur quantique à la seule définition qui en a été faite il y a une quarantaine d'années or cet ordinateur quantique « universel » n'existe pas à l'heure actuelle. Néanmoins, il existe plusieurs technologies quantiques permettant de s'en approcher : les modèles basés sur un jeu universel de portes quantiques mais actuellement très bruités (NISQ), les modèles à base de recuit quantique dédiés aux problèmes d'optimisation, les modèles s'appuyant sur les formulations quantiques utilisant la simulation et les modèles en configuration hybride. Etant donné la variété de ces technologies, il s'avère nécessaire de bien connaître les avantages et inconvénients de chacune pour optimiser leur utilisation. Cette comparaison est nécessaire mais, comme elle mobilise des spécialités différentes, elle n'est quasiment jamais réalisée. C'est l'un des aspects auxquels nous souhaitons nous attacher. Cette thèse vise à défricher une partie du chemin vers l'optimisation des systèmes par le calcul quantique.

Les machines déjà disponibles et qui profitent de l'intrication et du principe de superposition quantique ne fonctionnent donc pas toutes de la même manière, et les algorithmes s'y exécutant sont en général pensés pour fonctionner sur un seul type de machine. L'idée principale de cette thèse est de comparer les différentes méthodes d'optimisation sur les principaux types de machines quantiques, en particulier :

1. Les ordinateurs à recuit quantique. Ces machines sont principalement développées par D-Wave, comme la machine Advantage et ses 5760 qubits. Pour ces ordinateurs le travail se fait sur la modélisation du problème prenant la forme d'un QUBO (Quadratic Unconstrained Binary Optimisation). La partie délicate se situe au niveau de la relaxation des contraintes sous forme de pénalités dans la fonction Objectif.
2. Les ordinateurs NISQ (Nearly Intermediate Scale Quantum computer). IBM est le principal acteur de cette technologie, comme avec sa puce Osprey et ses 433 qubits. Pour ces machines NISQ, on utilisera une méthode QAOA (Quantum Approximate Optimization Algorithm).
3. Les ordinateurs de simulation comme celui de Pasqal (basé sur les réseaux d'atomes froids).
4. Les solutions hybrides alternant le calcul sur une machine quantique et sur machine classique selon les possibilités de chacune.

Il est également nécessaire d'adapter voire de développer de nouveaux algorithmes quantiques selon l'évolution des machines et des cas d'usage traités comme c'est le cas en informatique classique. Ces algorithmes s'appliquent ici dans le but d'optimiser des systèmes et notamment ceux liés à la chaîne d'approvisionnement (*supply chain*). On s'attache particulièrement au transport par l'optimisation des tournées. La qualité des solutions obtenues, la taille des problèmes à traiter et les temps de calculs forment les trois principaux critères d'évaluation d'un couple machine/algorithme. Il s'agit aussi d'estimer les possibilités futures selon une analyse prospective de l'évolution des machines, du nombre de leurs qubits, leur qualité, et la topologie utilisée, afin d'extrapoler la taille des problèmes qui pourront être traités.

En effet, d'une manière ou d'une autre, l'informatique quantique va bousculer les usages numériques. En démultipliant la puissance de calcul, au moins dans certains domaines tels que celui de l'optimisation, la taille des problèmes adressés peut

en être décuplée. Ceci ouvre un champ de possibilités très large et cela permet entre autres le traitement d'énormes quantités de données. En ce qui concerne cette thèse, les travaux se pencheront sur des situations où subsiste un besoin important d'optimisation puisque les capacités calculatoires requises ne sont absolument pas accessibles au calcul classique.

Les systèmes de tournées de véhicules et les systèmes de production sont autant de thématiques liées à la *supply chain*, où les tailles des problèmes que l'on rencontre aujourd'hui sont telles que la qualité des solutions s'éloigne de l'optimum et ceci est d'autant plus vrai dès lors que l'on multiplie les critères comme ceux liés au dérèglement climatique (e.g., minimisation de l'énergie). Que ce soit en traitant du problème du voyageur de commerce (*Traveling Salesman Problem*) jusqu'au problème de ramassage et de livraison (*Pickup and delivery problem*), en passant par les problèmes de *Lot-Sizing*, la littérature de la recherche opérationnelle foisonne de problèmes dont la taille des instances qui peuvent être résolues de manière efficace peine à grandir avec les algorithmes et ordinateurs classiques. Beaucoup d'aspects doivent être traités dans l'état de l'art initiant cette thèse : les types de machines quantiques, leurs algorithmes dédiés à l'optimisation, mais aussi des systèmes cibles où les possibilités de calculs classiques ne suffisent plus.

Résolument engagée dans les transitions à venir, convaincue qu'il est nécessaire de se préparer à l'utilisation routinière de ces ordinateurs et que ces ordinateurs auront un impact fort sur la société, JUNIA met le quantique au cœur de ses priorités. Cette proposition de thèse fait suite à une collaboration entre le LIMOS et JUNIA sur le développement d'une recherche en algorithmique quantique sur l'optimisation combinatoire.

Les deux équipes de recherche sont toutes deux expertes en recherche opérationnelle, particulièrement en optimisation combinatoire. Elles sont complémentaires sur leur expertise en machines quantiques, l'une (JUNIA) sur les machines adiabatiques de D-Wave, l'autre (laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes -LIMOS) sur les machines NISQ comme celles d'IBM. Ces équipes ont d'ores et déjà commencé à explorer les algorithmes correspondants. Cette collaboration vient du fait que S. Deleplanque (co-encadrant JUNIA) a réalisé sa thèse au laboratoire LIMOS auquel est rattaché P. Lacomme, le directeur de thèse envisagé. La collaboration a été entamée sur le sujet avec le projet inter-équipe INSIS du CNRS (BFC-282617) qui se terminera en novembre 2022.

S. Deleplanque (co-encadrant) et I. Lefebvre (co-directrice) sont des personnels de l'IEMN (Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie). Dans ce cadre, ils sont proches de chercheurs ayant fréquemment des optimisations à réaliser (process de fabrication, design de circuits, placement de capteurs, acoustique sous-marine etc...) et seront attachés à tirer parti des avancées théoriques de l'optimisation pour les applications de ce laboratoire.

Pour exploiter au mieux ces machines et algorithmes afin d'évaluer leur impact futur sur la société, il faut considérer des instances de problèmes réels. La société ACTEOS (Roubaix), éditeur et intégrateur de logiciels en *Supply Chain*, est prête à collaborer dans le cadre de l'établissement de preuves de concept (PoC) pour un scénario commercial réel consistant à piloter et ajuster les transports d'entreprises au niveau du service rendu aux clients, des performances économiques et aussi en termes de gain énergétique / réduction d'émission de CO₂. La collaboration avec un industriel bénéficiera aux développements actuels de la programmation quantique en optimisation. ACTEOS souhaite s'investir à hauteur de 25% du coût de la thèse.

L'exploitation et l'évaluation des différents types de machines quantiques, l'adaptation et l'élaboration d'algorithmes quantiques au service de l'optimisation, la collaboration entre les laboratoires LIMOS et IEMN, l'intégration de situations traitées par la société ACTEOS, l'incorporation de critères traduisant des objectifs de réduction des gaz à effet de serre dans le sens de l'optimisation, sont autant d'objectifs et d'enjeux portés par les travaux de recherche de cette thèse.