

Titre de la thèse : **Apprentissage profond et apprentissage automatique quantique pour modéliser et prédire les systèmes quantiques**

Laboratoire d'accueil : **ICB UMR 6303 CNRS UBE**

Spécialité du doctorat préparé : **Informatique**

Mots-clefs : **Apprentissage profond, Apprentissage automatique quantique, information quantique, contrôle quantique**

### **Descriptif détaillé de la thèse**

#### **Contexte**

La thèse se déroulera au sein du département I-SyNC (IA - Systèmes Numériques et Cyber-Physiques) du laboratoire ICB, Université Bourgogne Europe. La thèse est en collaboration avec l'équipe ICQ/DiTeQ de l'ICB, spécialisée dans le développement de l'information quantique.

#### **Résumé du projet de thèse**

L'objectif de ce travail de thèse est de développer des modèles d'apprentissage automatique, notamment basés sur le reinforcement learning et les transformers, pour modéliser et résoudre des problèmes liés à l'information quantique. En effet, les progrès récents des techniques d'optimisation numérique et des dispositifs expérimentaux ont permis la conception et la mise en œuvre de commandes capables de contrôler et manipuler avec précision des systèmes quantiques de complexité croissante. Les applications visées sont multiples : la métrologie quantique, le traitement de l'information quantique et le calcul quantique.

#### **Méthodologie**

Les architectures de type transformer peuvent être appliqués aux problèmes de physique quantique en exploitant leur capacité à modéliser des relations complexes et de grande dimension. Dans les systèmes quantiques, les états (par exemple les fonctions d'onde ou les matrices de densité) ainsi que les interactions entre particules peuvent être représentés sous forme de séquences ou de structures adaptées, permettant aux transformers d'apprendre ces corrélations grâce aux mécanismes d'attention. Les transformers sont particulièrement utiles pour des tâches telles que l'approximation des solutions de l'équation de Schrödinger, la prédiction des propriétés des systèmes quantiques, ou encore la modélisation des interactions à plusieurs corps, où les méthodes traditionnelles deviennent coûteuses en calcul. Le mécanisme d'attention permet notamment de capturer les dépendances à longue portée entre particules, ce qui est essentiel en mécanique quantique.

Dans ce contexte, ce travail de thèse se propose d'apporter les contributions suivantes :

- Identifier les éventuelles difficultés pour l'application de l'apprentissage automatique dans le domaine de la physique quantique afin de mettre en évidence les avantages et les limites de cette technique,
- Proposer des algorithmes et des modèles d'apprentissages automatiques basés sur le reinforcement learning et les transformers pour la représentation des états quantiques où ils peuvent aider à optimiser des circuits quantiques ou à prédire des résultats expérimentaux.
- Développer des algorithmes de quantum machine learning spécifiquement adaptés pour résoudre des problèmes d'information quantique.

On s'intéressera plus spécifiquement à des problèmes de contrôle quantique, où on doit déterminer les paramètres optimaux d'une commande externe, par exemple la forme d'une impulsion électrique radio-fréquence, pour effectuer des portes logiques efficace dans des ordinateurs à base de qubits

supraconducteurs, ou permettant des études de métrologie quantique (consistant à mesurer précisément les paramètres d'un système quantique).

### Références bibliographiques

- 1) Biamonte, J., Wittek, P., Pancotti, N., Rebentrost, P., Wiebe, N., & Lloyd, S. (2017). Quantum machine learning. *Nature*, 549(7671), 195–202. <https://doi.org/10.1038/nature23474>
- 2) Schuld, M., & Petruccione, F. (2021). *Machine Learning with Quantum Computers*. Springer. ISBN 978-3-030-83097-7
- 3) Schuld, M., & Killoran, N. (2019). Quantum machine learning in feature Hilbert spaces. *Physical Review Letters*, 122(4), 040504. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.040504>
- 4) McClean, J. R., Boixo, S., Smelyanskiy, V. N., Babbush, R., & Neven, H. (2018). Barren plateaus in quantum neural network training landscapes. *Nature Communications*, 9(1), 4812. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07090-4>
- 5) Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., et al. (2017). Attention is all you need. *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, 30, 5998–6008.
- 6) Tay, Y., Dehghani, M., Bahri, D., & Metzler, D. (2022). Efficient transformers: A survey. *ACM Computing Surveys*, 55(6), 1–28. <https://doi.org/10.1145/3530811>
- 7) Li, Y., Zhou, R., Xu, R., Luo, J., & Hu, W. (2022). A quantum deep convolutional neural network for image recognition. *Quantum Science and Technology*, 7(3), 035005.
- 8) Cherrat, E. A., Kerenidis, I., Mathur, N., et al. (2023). Quantum vision transformers. *Quantum*, 7, 1073. <https://doi.org/10.22331/q-2023-09-21-1073>
- 9) Preskill, J. (2018). Quantum computing in the NISQ era and beyond. *Quantum*, 2, 79. <https://doi.org/10.22331/q-2018-08-06-79>
- 10) Couturier, R., Dionis, E., Guérin, S., Guyeux, C. & Sugny, D. (2023). *Characterization of a Driven Two-Level Quantum System by Supervised Learning*. *Entropy* 25, 446.
- 11) Sobral, J. A., Perle, M., & Scheurer, M. S. (2025). *Physics-informed transformers for electronic quantum states*. *Nature Communications*, 16. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-66844-z>
- 12) Yu, K. Y., Sarkar, A., Russ, M. F., Ishihara, R., & Feld, S. (2025). *Transformer models for quantum gate set tomography*. *Quantum Machine Intelligence*, 7(1), Article 10. <https://doi.org/10.1007/s42484-025-00237-9>
- 13) Arslan, M., Munawar, S., & Cruz, C. (2025). *Sustainable Digitalization of Business with Multi-Agent RAG and LLM*. *CoRR abs/2502.15700*.
- 14) Arslan, M., Munawar, S., & Cruz, C. (2025). *Political Events using RAG with LLMs*. *CoRR abs/2502.15701*.
- 15) Bougzime, S., Ghanem, H., & Cruz, C. (2025). *Evaluating Neuro-Symbolic AI Architectures: Design Principles, Qualitative Benchmark, Comparative Analysis and Results*. *Proceedings of Machine Learning Research (PMLR)*, vol 284.
- 16) Boudouh, N., Mokhtari, B., & Fougou, S. (2025). [Research on Digital Twin Frameworks and AI-driven Healthcare Outcomes]. *International Journal of Multimedia Information Retrieval*.
- 17) Belhi, A., Bouras, A., Al-Ali, A. K., & Fougou, S. (2023). A machine learning framework for enhancing digital experiences in cultural heritage. *Journal of Enterprise Information Management*, 36(3), 734–746. <https://doi.org/10.1108/JEIM-10-2021-0435>
- 18) Belhi, A., Fougou, S., Bouras, A., & Sadka, A. H. (2020). Deep learning-based framework for missing label prediction in cultural heritage. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 16, e00133. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2020.e00133>

### Profil demandé

Le ou la candidate devra posséder une solide formation en informatique, mathématiques, ou physique ayant des connaissances en informatique/IA. Des compétences en programmation scientifique, notamment en

Python, seront attendues, ainsi qu'une capacité à conduire un travail mêlant théorie, développement algorithmique et validation expérimentale.

### Financement : MESRI Etablissement

Dossier à envoyer pour le 15 mai 2026

Début du contrat : 1<sup>er</sup> octobre 2026

Salaire mensuel brut : 2300€ brut

### Direction de la thèse

Christophe Cruz ([christophe.cruz@ube.fr](mailto:christophe.cruz@ube.fr))

### Encadrement de la thèse :

- Sebti Fofou ([sfoufou@gmail.com](mailto:sfoufou@gmail.com))
- Stéphane Guérin ([stephane.guerin@ube.fr](mailto:stephane.guerin@ube.fr))
- Dominique Sugny ([dominique.sugny@ube.fr](mailto:dominique.sugny@ube.fr))

Les candidates et candidats souhaitant postuler à cette offre de thèse sont invités à transmettre un dossier complet comprenant les documents suivants :

- un **curriculum vitae** détaillé, mettant en évidence le parcours académique, les enseignements suivis, les éventuelles expériences de recherche, les compétences techniques, ainsi que les publications, le cas échéant ;
- une **copie des relevés de notes et diplômes**, incluant notamment les résultats obtenus en Master (ou formation équivalente) ;
- une **lettre de motivation** de 1 à 2 pages, exposant l'intérêt du candidat ou de la candidate pour le sujet de thèse, les compétences ou expériences en lien avec le projet, ainsi que ses objectifs scientifiques et professionnels ;
- une ou plusieurs **lettres de recommandation** rédigées par des référents académiques ou professionnels connaissant le travail du candidat ou de la candidate.

Les dossiers de candidature devront être envoyés par courrier électronique à Christophe Cruz à l'adresse suivante : [christophe.cruz@ube.fr](mailto:christophe.cruz@ube.fr) avec copies à Sebti Fofou ([sfoufou@gmail.com](mailto:sfoufou@gmail.com)), Stéphane Guérin ([stephane.guerin@ube.fr](mailto:stephane.guerin@ube.fr)) et Dominique Sugny ([dominique.sugny@ube.fr](mailto:dominique.sugny@ube.fr)) avant le 15 mai 2026. Les dossiers incomplets ou transmis après la date limite ne seront pas examinés.

Après réception des candidatures, une phase de **pré-sélection** sera menée au regard de l'excellence académique, de la motivation et de l'adéquation avec les objectifs de la thèse. Les candidats retenus à l'issue de cette première étape seront contactés pour une **présentation orale suivie d'un entretien avec l'équipe encadrante**. Lors de cette audition, les candidats seront invités à présenter leur parcours, à préciser leur motivation, à discuter leur compréhension du sujet et des contributions qu'ils pourraient y apporter.

A l'issue de cette phase d'audition, un classement sera transmis à l'École Doctorale en charge de contacter et proposer l'emploi au premier candidat, puis par ordre de classement en cas de désistement.

Thesis Title: **Deep Learning and Quantum Machine Learning for Modeling and Predicting Quantum Systems**

Host Laboratory: **ICB UMR 6303 CNRS UBE**

Doctoral Specialty: **Computer Science**

Keywords: **Deep Learning, Quantum Machine Learning, Quantum Information, Quantum Control**

### **Detailed Thesis Description**

#### **Context**

The thesis will be carried out within the I-SyNC department (AI – Digital and Cyber-Physical Systems) of the ICB laboratory, Université Bourgogne Europe. The thesis is conducted in collaboration with the ICQ/DiTeQ team at ICB, which specializes in the development of quantum information.

#### **Thesis Project Summary**

The objective of this thesis is to develop machine learning models, notably based on reinforcement learning and transformers, to model and solve problems related to quantum information. Recent advances in numerical optimization techniques and experimental devices have enabled the design and implementation of control schemes capable of precisely controlling and manipulating quantum systems of increasing complexity. The targeted applications are numerous: quantum metrology, quantum information processing, and quantum computing.

#### **Methodology**

Transformer-based architectures can be applied to quantum physics problems by leveraging their ability to model complex, high-dimensional relationships. In quantum systems, states (e.g., wave functions or density matrices) as well as interactions between particles can be represented as sequences or adapted structures, allowing transformers to learn these correlations through attention mechanisms. Transformers are particularly useful for tasks such as approximating solutions to the Schrödinger equation, predicting the properties of quantum systems, or modeling many-body interactions, where traditional methods become computationally expensive. The attention mechanism can capture long-range dependencies between particles, which is essential in quantum mechanics.

In this context, this thesis proposes to make the following contributions:

- Identify potential difficulties in applying machine learning to quantum physics in order to highlight the advantages and limitations of this approach,
- Propose machine learning algorithms and models based on reinforcement learning and transformers for the representation of quantum states, which can help optimize quantum circuits or predict experimental results.
- Develop quantum machine learning algorithms specifically tailored to solve quantum information problems.

More specifically, we will focus on quantum control problems, where one must determine the optimal parameters of an external control – for example, the shape of a radio-frequency electrical pulse – to implement efficient logic gates in superconducting qubit-based computers, or to enable quantum metrology studies (which involve precisely measuring the parameters of a quantum system).

## Bibliographic References

- 1) Biamonte, J., Wittek, P., Pancotti, N., Rebentrost, P., Wiebe, N., & Lloyd, S. (2017). Quantum machine learning. *Nature*, 549(7671), 195–202. <https://doi.org/10.1038/nature23474>
- 2) Schuld, M., & Petruccione, F. (2021). *Machine Learning with Quantum Computers*. Springer. ISBN 978-3-030-83097-7
- 3) Schuld, M., & Killoran, N. (2019). Quantum machine learning in feature Hilbert spaces. *Physical Review Letters*, 122(4), 040504. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.040504>
- 4) McClean, J. R., Boixo, S., Smelyanskiy, V. N., Babbush, R., & Neven, H. (2018). Barren plateaus in quantum neural network training landscapes. *Nature Communications*, 9(1), 4812. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07090-4>
- 5) Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., et al. (2017). Attention is all you need. *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, 30, 5998–6008.
- 6) Tay, Y., Dehghani, M., Bahri, D., & Metzler, D. (2022). Efficient transformers: A survey. *ACM Computing Surveys*, 55(6), 1–28. <https://doi.org/10.1145/3530811>
- 7) Li, Y., Zhou, R., Xu, R., Luo, J., & Hu, W. (2022). A quantum deep convolutional neural network for image recognition. *Quantum Science and Technology*, 7(3), 035005.
- 8) Cherrat, E. A., Kerenidis, I., Mathur, N., et al. (2023). Quantum vision transformers. *Quantum*, 7, 1073. <https://doi.org/10.22331/q-2023-09-21-1073>
- 9) Preskill, J. (2018). Quantum computing in the NISQ era and beyond. *Quantum*, 2, 79. <https://doi.org/10.22331/q-2018-08-06-79>
- 10) Couturier, R., Dionis, E., Guérin, S., Guyeux, C. & Sugny, D. (2023). *Characterization of a Driven Two-Level Quantum System by Supervised Learning*. *Entropy* 25, 446.
- 11) Sobral, J. A., Perle, M., & Scheurer, M. S. (2025). *Physics-informed transformers for electronic quantum states*. *Nature Communications*, 16. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-66844-z>
- 12) Yu, K. Y., Sarkar, A., Russ, M. F., Ishihara, R., & Feld, S. (2025). *Transformer models for quantum gate set tomography*. *Quantum Machine Intelligence*, 7(1), Article 10. <https://doi.org/10.1007/s42484-025-00237-9>
- 13) Arslan, M., Munawar, S., & Cruz, C. (2025). *Sustainable Digitalization of Business with Multi-Agent RAG and LLM*. *CoRR abs/2502.15700*.
- 14) Arslan, M., Munawar, S., & Cruz, C. (2025). *Political Events using RAG with LLMs*. *CoRR abs/2502.15701*.
- 15) Bougzime, S., Ghanem, H., & Cruz, C. (2025). *Evaluating Neuro-Symbolic AI Architectures: Design Principles, Qualitative Benchmark, Comparative Analysis and Results*. *Proceedings of Machine Learning Research (PMLR)*, vol 284.
- 16) Boudouh, N., Mokhtari, B., & Fougou, S. (2025). [Research on Digital Twin Frameworks and AI-driven Healthcare Outcomes]. *International Journal of Multimedia Information Retrieval*.
- 17) Belhi, A., Bouras, A., Al-Ali, A. K., & Fougou, S. (2023). A machine learning framework for enhancing digital experiences in cultural heritage. *Journal of Enterprise Information Management*, 36(3), 734–746. <https://doi.org/10.1108/JEIM-10-2021-0435>
- 18) Belhi, A., Fougou, S., Bouras, A., & Sadka, A. H. (2020). Deep learning-based framework for missing label prediction in cultural heritage. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 16, e00133. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2020.e00133>

## Required Profile

The candidate must have a strong background in computer science, mathematics, or physics with knowledge in computing/AI. Proficiency in scientific programming, particularly in Python, is expected, along with the ability to carry out work combining theory, algorithmic development, and experimental validation.

## Funding: MESRI – Institution

Application deadline: 15 mai 2026

Contract start date: 1<sup>er</sup> octobre 2026  
Monthly gross salary: €2,300 gross

### Thesis Supervisor

Christophe Cruz ([christophe.cruz@ube.fr](mailto:christophe.cruz@ube.fr))

### Thesis Co-supervisors :

- Sebti Foufou ([sfoufou@gmail.com](mailto:sfoufou@gmail.com))
- Stéphane Guérin ([stephane.guerin@ube.fr](mailto:stephane.guerin@ube.fr))
- Dominique Sugny ([dominique.sugny@ube.fr](mailto:dominique.sugny@ube.fr))

Candidates wishing to apply for this PhD position are invited to submit a complete application including the following documents:

- a **curriculum vitae** detailing academic background, courses taken, any research experience, technical skills, and publications if applicable;
- a **copy of transcripts and diplomas**, incluant notamment les résultats obtenus en Master (ou formation équivalente) ;
- a **cover letter** of 1 to 2 pages outlining the candidate's interest in the thesis topic, relevant skills or experience, and scientific and professional objectives;
- a ou plusieurs **letters of recommendation** written by academic or professional references familiar with the candidate's work.

Applications must be sent by email to Christophe Cruz at: [christophe.cruz@ube.fr](mailto:christophe.cruz@ube.fr) with copies to Sebti Foufou ([sfoufou@gmail.com](mailto:sfoufou@gmail.com)), Stéphane Guérin ([stephane.guerin@ube.fr](mailto:stephane.guerin@ube.fr)) and Dominique Sugny ([dominique.sugny@ube.fr](mailto:dominique.sugny@ube.fr)) before May 15, 2026. Incomplete applications or those received after the deadline will not be considered.

After receipt of applications, a phase of **pre-selection** will be conducted based on academic excellence, motivation, and alignment with the thesis objectives. Candidates selected at this stage will be contacted for an **oral presentation followed by an interview with the supervision team**. During this hearing, candidates will be invited to present their background, clarify their motivation, discuss their understanding of the topic, and outline their potential contributions.

Following the hearing, a ranking will be submitted to the Doctoral School, which will contact and offer the position to the top-ranked candidate, then to subsequent candidates in order of ranking in case of withdrawal.