

Proposition de création d'une chaire « Algorithmes, calcul et logiciels quantiques »

v.20250918

Avertissement - de manière très stylisée, quand on évoque les technologies et l'expertise quantiques, ce sont souvent trois domaines qui sont mentionnés : calcul quantique, communications quantiques et capteurs quantiques. Cette première proposition ne se focalise que sur l'algorithmique et le calcul quantique, et leur intégration logicielle.

Rattachements¹ - formation : EPN 5 Informatique ou EPN 6 Mathématiques et Statistiques ; recherche : le laboratoire Modélisation mathématique et numérique (M2N, EA7340) ou le Laboratoire Centre d'études et de recherche en informatique et communications (Cédric, EA4629).

Domaines d'expertises, mots-clés : algorithmes quantiques, calcul quantique, calcul scientifique, logiciel quantique, *quantum software*, informatique quantique, langages de programmation quantiques, émulateurs et simulateurs quantiques, compilateurs quantiques, communications quantiques, cryptographie (post-)quantique.

Une très brève histoire du quantique

On distingue en général deux grandes révolutions quantiques : (i) la première révolution quantique (années 1900-1950) avec l'émergence de la mécanique quantique qui a permis de comprendre et d'exploiter les phénomènes quantiques de base (quanta d'énergie, dualité onde-corpuscule, superposition, ...) avec les travaux d'Einstein, Bohr, Planck, Schrödinger, Heisenberg, Dirac, etc. ; (ii) la deuxième révolution quantique (depuis 1980) qui consiste à contrôler activement les états quantiques individuels (superposition, intrication, décohérence maîtrisée, ...) et qui a notamment permis le fondement de l'informatique quantique.

Si la première révolution aura permis le développement d'applications très utilisées aujourd'hui (transistor, laser, imagerie médicale - IRM -, horloges atomiques, GPS), la seconde est toujours en cours et permet notamment la réalisation de capteurs ultra-précis et le développement d'ordinateurs quantiques - ce qui donne lieu aujourd'hui à une course mondiale entre différents acteurs, *startups/spinoffs* souvent issues de grands laboratoires et soutenues par de grands acteurs technologiques, eux-mêmes parties prenantes, et des états souverains.

Certains chercheurs parlent déjà d'une troisième révolution quantique qui correspondrait au moment où ces technologies passerait du stade expérimental ou prototypal à une

¹ Différents rattachements peuvent être envisagés tant pour les EPNS que pour les laboratoires de recherche. Parmi la multiplicité des domaines scientifiques qui sont impactés par le « quantique », l'auteur a choisi dans cette proposition de se focaliser sur les algorithmes, le calcul et toute la partie logicielle qui devra nécessairement venir « habiller » les ordinateurs quantiques lorsque ceux-ci se seront davantage développés.

adoption massive et industrielle (comme la révolution numérique dans les années 1990-2000), avec de nombreuses applications transversales : en chimie, en pharmacie et dans la santé plus généralement, avec la découverte accélérée de nouveaux matériaux et médicaments facilitée par du calcul d'encore plus haute performance que ce qui existe aujourd'hui ou par une imagerie médicale plus fine grâce à divers capteurs quantiques ; dans l'intelligence artificielle avec l'intégration du calcul quantique dans l'entraînement des modèles² ; dans les télécommunications et la cybersécurité avec par exemple la mise en place d'un Internet quantique sécurisé par intrication et distribution de clés quantiques, etc. Correspondant au moment où les technologies quantiques cessent d'être un domaine de labo pour devenir partie intégrante de notre quotidien économique et technologique, cette révolution - qui en est à ses balbutiements - devrait s'appuyer notamment sur une double maturité *hardware* et *software*. D'une part, on estime que les ordinateurs quantiques en cours de construction devraient devenir disponibles « *as a service* » à l'horizon 2030-35. Ainsi le gouvernement français a lancé en mars 2024 le programme PROQCIMA dont l'objectif est de disposer en 2032 d'au moins deux prototypes d'ordinateur quantique universel tolérant aux fautes de 128 qubits logiques, capables de passer à l'échelle et étendus à 2048 qubits logiques en 2035³⁴. D'autre part, le développement du calcul quantique et du *quantum software* ou logiciel quantique devrait être l'une des clés de voûte de cette révolution en créant ainsi un nouvel écosystème complet (*clouds* quantiques, *software development kits* - SDKs - pour des langages de programmation conçus spécifiquement pour le calcul quantique⁵ ou étendus au quantique, et donc des développeurs spécialisés - des *quantum software engineers* -, etc.).

État de l'art au CNAM, en France, à l'international

La France a une ambition très forte dans le domaine des applications quantiques, à la fois car elle possède d'excellents chercheurs⁶ et car elle a été capable d'identifier tôt les impacts de rupture considérables que ces diverses technologies pourraient avoir tant dans le domaine civil que dans le domaine militaire⁷, avec les forts enjeux de défense liés à ces technologies⁸.

² On pourra consulter à ce sujet « Quantum computing and artificial intelligence: status and perspectives », available at <https://arxiv.org/abs/2505.23860>.

³ <https://www.info.gouv.fr/actualite/france-2030-point-detapes-trois-ans-apres-le-lancement-de-la-strategie-nationale-des-technologiques-quantiques-et-lancement-du-programme-proqcima#:~:text=PROQCIMA%20vise%20%C3%A0%20disposer%20de,conception%20fran%C3%A7aise%20%C3%A0%20horizon%202032>.

⁴ On pourra consulter le rapport de l'Académie des Technologies récent sur le sujet : <https://www.academie-technologies.fr/publications/etat-de-lart-de-lordinateur-quantique-tolerant-aux-fautes/#:~:text=Rapport%20de%20l'Acad%C3%A9mie%20E2%80%93%20Mai,bruit%20inh%C3%A9rents%20aux%20syst%C3%A8mes%20quantiques>.

⁵ Par exemple Q# pour Microsoft, Qiskit pour IBM ou Cirq pour Google.

⁶ Si le grand public connaît des figures emblématiques comme les physiciens Serge Haroche ou Alain Aspect, qui ont tous les deux reçu le prix Nobel de physique sur des sujets de physique quantique, l'écosystème de recherche français est extrêmement dense (Inria, CEA, etc.) et reconnu à l'international.

⁷ On pourra par exemple consulter <https://www.defense.gouv.fr/actualites/plan-quantique-strategie-ambitieuse-souveraine>.

⁸ Ainsi, certains nouveaux capteurs quantiques renforcent la capacité de navigation autonome et furtive des sous-marins, en permettant un positionnement plus précis sans besoin de recalibrage de surface de type GPS. De même, dans le domaine de la cryptographie, la capacité d'un ordinateur quantique à implémenter

Dans le sillage du rapport « Quantique : le virage technologique que la France ne ratera pas » qui avait été commandé en mars 2019⁹, la France a dévoilé sa « Stratégie nationale sur les technologies quantiques » en janvier 2021 qui prévoyait un investissement total de 1,8 milliard d'euros sur 5 ans¹⁰. Au niveau européen, on estime qu'environ 11 Mds € de fonds publics ont déjà été injectés dans le quantique sur les 5 dernières années (c.2 Mds € côté UE et c.9 Mds € des Etats membres). La Commission européenne prépare maintenant un Quantum Act pour stimuler le développement des technologies quantiques. La loi, qui est en préparation pour 2026, fait suite à la publication de la stratégie quantique visant à faire de l'Europe un leader dans le domaine de la technologie d'ici 2030. Cette stratégie prévoit la création de six lignes pilotes et d'un centre de conception quantique. On estime que d'ici 2040, le secteur devrait créer des milliers d'emplois hautement qualifiés dans l'UE et dépasser une valeur globale de 155 milliards d'euros. La stratégie européenne vise cinq domaines : la recherche et l'innovation, les infrastructures quantiques, le renforcement des écosystèmes, les technologies spatiales et à double usage, et les compétences quantiques.

Face à la transversalité du sujet, le Cnam a de nombreux atouts, à commencer par ses compétences en physique quantique et ses applications grâce à son Laboratoire Commun de Métrologie LNE-Cnam, une référence nationale et internationale, et à ses activités affiliées. D'autres laboratoires tels que son Centre d'études et de recherche en informatique et communications (Cédric, EA4629), son laboratoire Modélisation mathématique et numérique (M2N, EA7340), son Laboratoire Génomique, Bioinformatique, et Chimie Moléculaire (GBCM, EA7528) et son Laboratoire interdisciplinaire de recherches en sciences de l'action (Lirsa, EA4603) devraient naturellement être associés aux problématiques de développement du calcul quantique et à ses applications. Et si parmi les différents axes d'application du quantique, on cherche à identifier ceux où il y a à la fois un besoin stratégique fort, au niveau national et européen, et ceux où le Cnam possède déjà un socle préexistant solide, les deux domaines des algorithmes et du calcul scientifique d'une part, et de l'informatique et du logiciel d'autre part, ressortent - de manière non exhaustive bien sûr car d'autres domaines pourraient être cités.

En effet, le Cnam dispose déjà d'une forte compétence en calcul scientifique et en calcul haute performance (CHP) par son laboratoire Modélisation mathématique et numérique (M2N - EA 7340) qui s'intéresse principalement aux problèmes de modélisation issus du monde industriel et économique et qui regroupe des enseignant.e.s-chercheur.euse.s et des ingénieur.e.s dont les compétences s'articulent autour du calcul scientifique et du contrôle. De même, par son Centre d'études et de recherche en informatique et communications (Cédric, EA4629), qui regroupe les activités de recherche en sciences du numérique menées en son sein, le Cnam possède l'un des laboratoires d'informatique les plus reconnus sur le plan national. Par ailleurs, grâce à son laboratoire Génomique, Bioinformatique, et Chimie Moléculaire (GBCM, EA7528), le Cnam peut également s'appuyer sur un savoir-faire déjà établi dans l'utilisation de simulations informatiques pour développer de nouveaux médicaments, l'une des applications les plus prometteuses du calcul quantique. Enfin, tous les domaines qui nécessitent du calcul

l'algorithme de Shor pour factoriser un grand entier N pourrait menacer à terme la sécurité de la cryptographie asymétrique de type RSA, d'où la nécessité d'évoluer vers une cryptographie post-quantique.

⁹ On pourra trouver ce rapport sur le site : <https://quantique.france2030.gouv.fr/rapports/>

¹⁰ On peut consulter la stratégie nationale quantique sur <https://quantique.france2030.gouv.fr/>

haute performance (e.g. finance quantitative, assurance, modélisation des risques, ...) sont concernés.

La mise en place d'une chaire « Algorithmes, calcul et logiciels quantiques » semble donc aussi opportune que vitale pour l'établissement, et répondrait à un besoin stratégique fort pour la France et l'Europe, tout en étant parfaitement complémentaire avec l'expertise actuelle du Cnam en mathématiques appliquées/algorithmique/calculation scientifique, en intelligence artificielle, et en informatique/logiciels. Plus généralement, on devrait s'attendre à ce que la création d'une chaire explicitement liée à un domaine d'application du quantique crée un « effet de ruissellement » sur la visibilité de l'établissement sur ce sujet, favorisant ainsi les possibilités de collaboration et de financement dans d'autres champs du « quantique » au-delà de ceux précités. Les collaborations potentielles tant avec des instituts de recherche (INRIA, ...) qu'avec des industriels (Thalès, ...) seraient très nombreuses.

Création et évolution des emplois

On peut articuler les technologies quantiques selon 3 piliers - (i) le calcul quantique, (ii) les communications quantiques et (iii) les capteurs/senseurs quantiques. Il a été projeté que ces champs d'application devraient générer jusqu'à 97 Mds € de revenus dans le monde d'ici 2035 - le calcul quantique prenant la part du lion avec des revenus passant de 4 Mds € en 2024 à 72 Mds € en 2035¹¹. Cette forte croissance devrait affecter de nombreuses industries : chimie, sciences de la vie, finance, transports, etc.

Ceci nécessite de repenser à la fois les compétences des professionnels, et donc les formations diplômantes et certifiantes offertes dans ce domaine, et les thématiques de recherche associées.

Résumé, incluant enjeux et impact économique et sociétal¹²

On peut raisonnablement estimer qu'il y a entre 300 000 et 500 000 développeurs informatiques en France selon comment on définit « développeur » (e.g. salarié ou freelance, niveau, spécialité, etc.), avec des métiers qui restent en tension. Ainsi France Stratégie a évalué à 180 000 le nombre des emplois à pourvoir dans l'informatique et la recherche d'ici 2030 et estime que le nombre d'ingénieurs de l'informatique devrait augmenter de 115 000 postes entre 2019 et 2030, soit 26% d'augmentation pour un ensemble de c.440 000 postes attendus en 2030¹³.

Description éventuelle, dès ce stade, des missions attenantes à la chaire

(Conformément aux articles 7 et 2 du Décret n° 2019-1122 du 31 octobre 2019)

¹¹ <https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/the-year-of-quantum-from-concept-to-reality-in-2025>

¹² Cette partie sera précisée dans une version ultérieure de la proposition.

¹³ https://www.strategie-plan.gouv.fr/files/files/Publications/2021%20SP/2022-03-10%20-%20Les%20m%C3%A9tiers%20en%202030/fs-2022-pmq-rapport-mars_4.pdf

Le/La professeur(e) de chaire qui sera recruté(e) devra assumer cinq missions principales détaillées ci-après, qu'elles portent sur l'enseignement de ... et l'appui au déploiement des formations du Cnam, sur la recherche ou sur le rayonnement scientifique et institutionnel.

- Enseignements et appui au déploiement des formations du conservatoire ;
- Recherche scientifique ou innovation ;
- Développement de liens et de collaborations avec le monde socio-économique ;
- Diffusion de la culture et de l'information scientifique et technique & contribution à la vie collective du conservatoire.

En raison de l'importance socio-économique du secteur, la chaire aura une forte capacité à renforcer la visibilité du Cnam par :

- L'organisation de séminaires ou de colloques académiques et professionnels ;
- La participation à des salons de formation ;
- La publication d'articles scientifiques dans des revues de référence.

Rapporteur.e.s suggéré.e.s par les proposants (éventuellement)

Auteur.e.s de la proposition

Alexis Collomb, Taraneh Sayadi.