INFORMATIQUE QUANTIQUE : QUELLES COMPÉTENCES POUR RÉPONDRE AUX ENJEUX DE LA TRANSFORMATION NUMÉRIQUE ?

L'association Talents du Numérique, qui associe établissements d'enseignement supérieur et entreprises du Numérique, a réalisé un travail important sur le développement des compétences des professionnels niveau Bac+5 du secteur du Numérique.
La commission compétences de Talents du Numérique a pour objectif de préparer l'avenir des entreprises et des établissements de formation afin que le secteur soit en mesure de réagir à l'évolution des compétences recherchées, alors que de nouvelles technologies arrivent et se déploient. Dans le cadre de cette note, nous tenons tout particulièrement à remercier les experts de Capgemini et de Microsoft pour avoir participé à nos échanges et alimenté le débat.

ÉLÉMENTS DE CONTEXTE ET DE DÉFINITION[1]

Depuis quelques temps, le phénomène « informatique quantique » est apparu sur la scène médiatique avec la promesse de changements considérables au niveau technologique mais également dans le quotidien des particuliers, des États et organisations, à l'instar de ce qu'a pu représenter, pour le monde, l'arrivée d'Internet. Bien évidemment, ces nouvelles technologies ne sont pas exemptes de défis - économiques, socio-anthropologiques ou encore juridiques - en lien avec la gouvernance et le déploiement qu'elles nécessitent. Ces challenges représentent aussi d'incroyables opportunités pour toutes celles et ceux souhaitant participer à cet avènement qui pourrait remodeler le monde tel que nous le connaissons.
En effet, les révolutions numérique et de l'informatique quantique que nous vivrons à l'horizon 2030 dépassent largement le cadre purement technologique. Elles pourraient bousculer les équilibres économiques et transformer les usages à une vitesse jamais atteinte jusque-là. Elles touchent tout autant les clients des entreprises numériques - dans leurs activités, leurs chaînes de valeur et leurs organisations, que les individus - dans leur vie quotidienne - et la société en général - dans ses règles et ses équilibres. Le sujet est d'autant plus important qu'il influe sur des piliers du secteur, tels que la confiance numérique. Selon la manière dont il sera pris en compte, il pourrait tout aussi bien renforcer qu'altérer significativement le soutien du grand public à cette dynamique.

☐ INFORMATIQUE QUANTIQUE : LES GRANDS CONCEPTS

L'informatique quantique est un système informatique théorique utilisant les propriétés du monde quantique. Elle offre, potentiellement, une puissance de calcul considérable. C'est un vrai changement de paradigme : l'utilisation d'un ordinateur quantique n'implique pas les mêmes principes que celle d'un ordinateur classique. Les phénomènes quantiques utilisés sont **l'intrication quantique et la superposition.** Pour mieux appréhender le phénomène, il convient de rappeler quelques concepts de physique quantique[2] :

- **Le concept de superposition d'états**

  La superposition est la capacité contre-intuitive d'un objet quantique, comme un électron, à exister simultanément dans plusieurs "états" différents. Il est littéralement dans ces différents états à la fois : dans un état **et** dans autre, sans faire une moyenne des deux.

[1] https://syntec-numerique.fr/system/files/Documents/Livre-Blanc-Guide-pratique-pour-reussir-sa-transformation-par-linnovation.pdf
[2] https://www.inria.fr/fr/comment-fonctionne-un-ordinateur-quantique

Une mesure détruira cette superposition, et ce n'est qu'alors qu'on pourra dire qu'il est dans l'état inférieur ou supérieur.

- **La mesure dans la mécanique quantique**

On ne peut mesurer deux quantités dont la connaissance simultanée est impossible : la position et la vitesse d'une particule, par exemple. Il est ainsi important de savoir ce que l'on mesure, sans quoi on perturbe l'état. C'est ce qu'on appelle « l'action retour de la mesure » : si on mesure l'état quantique, on peut, de manière irréversible, changer son état.

- **Pas de manipulation de bits dans un état 1 ou 0 mais de qubits en 1 et 0**

Les opérations ne sont plus fondées sur la manipulation de bits dans un état 1 ou 0, mais de qubits en superposition d'états 1 et 0.
En effet, les ordinateurs classiques ou conventionnels sont programmés avec des bits comme unité de données. Chaque bit peut stocker un 0 ou un 1. Pourtant, ces ordinateurs sont mis face à leurs propres limites lorsqu'ils se retrouvent confrontés à un problème de variables multiples. Dans ce cas, les ordinateurs doivent effectuer un nouveau calcul chaque fois qu'une variable est modifiée. Chaque calcul est un chemin unique vers un résultat unique. L'ordinateur quantique, lui, se base sur les concepts expliqués ci-dessus. En raison des lois de la mécanique quantique, il utilise des qubits, qui peuvent représenter une combinaison de 0 et de 1 en même temps, selon le principe de superposition. Chaque qubit existe ainsi en multiples états de 0 et 1, simultanément. L'ordinateur quantique va ainsi exploiter l'intrication entre les qubits et les probabilités associées aux superpositions pour effectuer une série d'opérations, de telle sorte que certaines probabilités soient augmentées (c'est-à-dire celles des bonnes réponses) et d'autres diminuées, voire rendues nulles (c'est-à-dire celles des mauvaises réponses).

☐ DES CHAMPS D'APPLICATION ÉTENDUS

Les ordinateurs quantiques promettent de réussir à résoudre différents types de problèmes, parfois encore insolubles, en un temps raisonnable. Les ordinateurs quantiques ne remplaceront pas les systèmes actuels mais ils seront utilisés pour différents types de problèmes, incroyablement complexes, dans lesquels l'élimination d'un large éventail de possibilités permettra de **gagner un temps extrêmement important.**
Le potentiel de l'informatique quantique est avéré notamment **en matière de simulation moléculaire.** Les usages sont ainsi particulièrement intéressants **autour des matériaux** (ex : ligne électrique sans perte avec des matériaux supraconducteurs), **en chimie** (possibilité de mener de nouvelles réactions, de développer de nouveaux médicaments) ou encore **pour capturer le carbone**.
Le potentiel de l'informatique quantique est également significatif **en matière d'optimisation,** qu'il s'agisse de logistique, de traitement du signal, de machine learning, de gestion des ressources... Il est aussi reconnu, et plus mûr, avec une dimension physique forte : **associé aux capteurs, utilisé en métrologie ou en horlogerie**, par exemple.
Les champs des applications sont donc immenses : santé, énergie, environnement, chimie, télécommunication, défense/sécurité, banque/finance/assurance, industrie (…).

☐ MATURITÉ : DES PROTOTYPES EN COURS DE DÉVELOPPEMENT

Les problématiques qui pourraient être résolues grâce au quantique ne sont pas encore toutes connues. C'est ce sur quoi, entre autres, travaillent aujourd'hui les acteurs de la recherche. À noter : en informatique, **le développement de la partie logicielle est plus avancé que la partie matérielle.** Si la technologie est relativement récente, une part considérable des calculs quantiques est effectuée au niveau des qubits. Nous pourrions aisément comparer cela à l'exploitation des ordinateurs classiques au début des années 1960, comme dans le programme Apollo de la NASA.

- Des **prototypes d'ordinateurs quantiques,** avec des capacités pouvant atteindre 50 qubits sont **en cours de développement.**
- **De nombreux algorithmes quantiques ont d'ores et déjà été inventés**
  - Algorithme de Shor (factorisation de nombre)
  - Algorithme de Grover (recherches dans les bases de données)
  - Algorithme HHL (résolution des systèmes d'équations linéaires)
  - Estimation quantique de phase (simulation moléculaire)
  - Marches quantiques (recherche d'un optimum)

Notons que les **progrès et les évolutions sont rapides** en ce domaine. Les premières applications, notamment en crypto, devraient apparaître dans 5 ans. Sans prise en compte de la question en amont, il y a un risque, pour les promotions d'étudiants en cours de formation, d'être écartées des opportunités du marché du travail par les promotions des années 2030 qui auront été pleinement formées à cette technologie.

COMPÉTENCES, CONNAISANCES REQUISES & OFFRE DE FORMATION

☐ BESOINS EN COMPÉTENCES : UNE DEMANDE EN PROGRESSION

Les initiatives se multiplient pour tester le potentiel de l'informatique quantique : création de projets pilotes et lancement de prototypes. **En dehors du secteur numérique stricto sensu, les secteurs de la chimie et de l'énergie/environnement sont les principaux recruteurs,** des start-ups aux grandes entreprises.
Les profils concernés sont expérimentés et pointus : connaissance préalable des langages, bonne maîtrise des techniques de calcul scientifique, expérience en algorithmie approfondie. Nous retrouvons ici **des compétences proches de celles enseignées dans une école d'informatique** classique. Cependant, **une appétence forte pour les mathématiques** est nécessaire.

Certains acteurs sont plus en avance que d'autres dans leur stratégie « Informatique quantique ».
De grands groupes du numérique étudient la technologie depuis quelque temps déjà, tandis que d'autres observent et veulent valider au préalable le concept et les business model associés. De façon générale, tous les acteurs du numérique devraient s'y intéresser de près ou de loin. **Beaucoup de sociétés de conseil sont d'ailleurs en cours de constitution d'équipes.**

À l'heure actuelle, **sur la partie concernant le matériel et le hardware quantique,** les entreprises et les laboratoires recherchent **des physicien.ne.s de niveau doctorat, des spécialistes de cryogénie, de l'automatisation des expériences (…).**
Sur l'informatique quantique, on recherche :

- **des algorithmicien.ne.s** (algorithmes quantiques et classiques)
- **des développeur.se.s** (langages quantiques et classiques)

Cependant, les postes ouverts par les entreprises sont de natures diverses et le profil idéal n'existe pas. Les candidates et candidats doivent disposer des compétences et présenter les spécificités suivantes

- un **esprit scientifique**
  - **Bac+8** ou équivalent en mathématiques, physique, informatique ou génie logiciel
  - **Expérience en algorithmie** approfondie
  - Bonne maîtrise des **techniques de calcul** scientifique
- Une **expertise technologique**
  - Maîtrise des outils de calcul scientifique (**Python**, a minima)
  - Compétences en **informatique fondamentale** (Hardware & Software)
  - Bonnes connaissances en **technologie quantique**
- Une **expertise métier** : une **bonne maîtrise d'un domaine industriel** en lien avec un *use case* (cas d'usage) potentiel est souvent nécessaire. L'élément clé d'un POC en quantique est la traduction d'un problème classique en un problème quantique. Ceci implique que l'expert.e quantique maîtrise bien le métier industriel concerné.
- Des softskills : adaptabilité, autonomie et créativité

Au-delà, à l'horizon 2030-2040, les besoins de l'économie en professionnels de l'informatique quantique sont immenses. L'informatique quantique pourrait faire partie intégrante de l'ensemble des domaines informatiques et des projets numériques. **On peut d'ores et déjà anticiper que le recrutement de ces profils, expert.e.s en informatique quantique, sera une difficulté majeure pour les entreprises du numérique.**

À noter, la **demande est forte actuellement sur les profils d'enseignants-chercheurs,** rares et recherchés sur ces thématiques. La pénurie de talents étant globale, on la retrouve sur ces emplois, fondamentaux pour former massivement des jeunes et des moins jeunes à l'informatique quantique.

☐ L'OFFRE DE FORMATION

L'offre de formation en informatique quantique est **encore réduite et parcellaire.** Rares sont les établissements qui en font une majeure dans leurs enseignements. **Des initiatives pionnières ont néanmoins vu le jour afin de développer une offre de niveau Bac+5.** Nous pensons notamment au Master d'Informatique - Information Quantique (IQ) de **Sorbonne université**, ouvert à la rentrée 2021. Principalement dispensée en anglais pour les étudiants et étudiantes de Sorbonne Université et d'autres institutions, françaises ou internationales, cette formation propose un diplôme final de master d'informatique avec une spécialisation en information quantique **pour des diplômé.e.s de licence d'informatique avec un fort intérêt pour la physique. On retrouve également des centres d'excellence à Paris-Saclay, à Grenoble (CEA, INP, UGA), mais aussi à Bordeaux, Strasbourg, Lille (…).**

Les établissements de formation commencent à **intégrer des éléments de sensibilisation sur cette thématique dans leurs cursus,** des initiations avec des intervenants externes issus du monde industriel ou des startups, et/ou des chercheurs et chercheuses pour la dimension expérimentale. **La grande majorité s'intéresse à ce sujet, développe une réflexion** sur la possibilité d'ouvrir des formations **mais attend des signaux plus clairs de la part du monde socio-économique** pour valider la réalité des débouchés.

Une des difficultés perçues est l'identification de vrais experts pour les enseignements, car c'est une matière vivante, en forte évolution. **Un autre point de réserve réside dans l'investissement financier induit,** lourd en matériel, avec une durée de vie de cet outillage potentiellement faible.

☐ CONNAISSANCES REQUISES

L'informatique quantique nécessite **des compétences dans tous les domaines scientifiques, techniques, industriels concernés par les systèmes d'information et de communication** ce qui rend le sujet particulièrement excitant mais, en contrepartie, particulièrement complexe à appréhender. Le domaine de l'informatique quantique apparaît ainsi particulièrement novateur.
Au-delà de **la formation de base d'un.e ingénieur.e considérée comme un prérequis**, un programme de formation en informatique quantique doit comporter les dimensions suivantes :

- **Algorithmique quantique**
- **Cryptographie quantique**
- **Information quantique**
- **Théorie de l'information**

De solides bases en physique et un fort intérêt pour cette science sont également nécessaires pour appréhender la partie « métier » du quantique.

Les environnements de développement sont les suivants : Qiski, PennyLane, tlket>, AQASM, cQASM, openQASM, Q#, QCL, qGCL, Q++, CirQ, SilQ, D-Wave Ocean Software, QC Ware Forge, AWS Quantum Bracket, Microsoft Azure Quantum

Et les technologies disponibles :

- Calculateur quantique superconducteur : Google, IBM, IMEC, Rigetti, Intel, qci
- Calculateur quantique pièges à ions : IONQ, Honeywell
- Calculateur quantique optique linéaire : USTC (Chine), Xanadu, Quandela
- Calculateur quantique lattice atomique : Pasqal
- Calculateur quantique qubit spin : Qu-Tech
- Recuit quantique : Dwave
- Simulateurs quantiques : Atos

☐ DE LA MENÉE DE PROJETS EN « INFORMATIQUE QUANTIQUE »

Il est clair que les projets relevant de l'informatique quantique ne pourront jamais être l'affaire d'une seule personne - aussi polyvalente soit-elle - regroupant toutes les compétences citées ci-dessus. Aussi, la réussite de projets de cette nature dépendra de la capacité qu'auront leurs promoteurs à **réunir une équipe associant toutes les compétences attendues.**

Le développement de projets en informatique quantique est connu comme étant **d'une mise en œuvre très complexe** nécessitant des compétences hybrides de **savoir**, de **savoir-faire** mais aussi de **savoir-être,** en raison de la **diversité des acteurs engagés**. Le besoin en compétences techniques et scientifiques du numérique pour participer à cette nouvelle industrie est évident, mais celles-ci ne suffisent pas forcément.

Les équipes constituées par les entreprises dans le quantique comportent

- **des expert.e.s métiers** : Services financiers, Chimie, Vente …
- **des expert.e.s technologiques** : IA, Blockchain, 5G, QTech ….

CONCLUSION – RECOMMANDATIONS

Les formations, écoles et entreprises membres de l'association Talents du numérique sont convaincues de l'intérêt de l'informatique quantique, même si ce phénomène souffre encore d'incertitudes, en matière d'évolution, de business model et de scalabilité. Le marché de l'emploi sur cette nouvelle thématique doit encore se constituer de façon pérenne et avec des volumes significatifs à des niveaux Bac+5. Les besoins en compétences dans le domaine de l'informatique quantique sont, à l'heure actuelle, modestes, chiffrés à plusieurs dizaines d'emplois en France en 2022, essentiellement des docteur.e.s en physique, mathématiques ou génie logiciel.
Cependant le potentiel de développement et de croissance de cette technologie, poussé par la stratégie et les investissements étatiques actuels, est suffisamment important pour que les établissements de formation membres de l'association anticipent le besoin et se mobilisent pour y répondre, en formation initiale ou continue. Il revient aux entreprises et écoles du numérique - au-delà des pionnières et early-adopters, déjà à l'œuvre - de savoir prévoir les changements en cours, et de former de futur.e.s professionnel.le.s en capacité de faire pleinement face aux révolutions à venir.
Trois difficultés sont cependant relevées : l'attractivité de ces formations, le niveau requis en mathématiques et le manque d'enseignants.

Talents du Numérique et ses membres se félicitent de la mobilisation des pouvoirs publics pour structurer le développement de cette technologie et de cette filière, même si l'action de l'État reste encore faible pour développer l'offre de formation, développer l'appétence pour cette thématique des futur.e.s professionnel.le.s du numérique, des professionnel.le.s de notre économie et de l'ensemble de nos concitoyens.

En termes de formation, les établissements et entreprises réunies au sein de Talents du Numérique insistent sur la nécessité de développer une approche globale et systémique. L'informatique quantique deviendra un sujet transversal qui pourrait faire partie intégrante de nombreux projets numériques et donc de toute démarche de transformation numérique. Ainsi, une formation en informatique quantique doit couvrir l'ensemble de la chaîne, de la conception à la production.

Notre commission recommande :

- ⇨ En matière d'attractivité, de faire des actions de communication pendant les cursus étudiants ; il convient d'informer et de donner envie à des jeunes de prendre ces cursus/modules spécifiques de niveau Bac+5 et de favoriser la multiplication des thèses, encore trop rares dans notre système marqué par le cadre de l'ingénieur.e à la française.
- ⇨ Concernant la formation initiale, il convient :
  - d'enseigner les concepts et les cas d'usages principaux de l'informatique quantique dans les formations. L'ensemble des étudiant.e.s devrait être amené.e à suivre durant son cursus une initiation / une formation aux concepts globaux de l'informatique quantique ;
  - de définir cette matière comme un possible élément de spécialisation de 3e année, ou de l'imaginer comme un élément de certification spécifique.
  - d'intégrer à terme l'informatique quantique comme une spécialité à part entière
  - de renforcer l'interdisciplinarité (Informatique, électronique, optique, physique (…) dans les établissements et de décloisonner l'organisation par département qui structure souvent ces organisations.
- ⇨ De développer et renforcer la formation continue. Elle est et sera particulièrement importante en ce domaine. Nous sommes convaincus que la problématique de la pénurie de talents ne peut être résolue uniquement par la formation initiale, c'est illusoire à court terme compte tenu des flux de ces filières.

Par ailleurs, le niveau exigé en mathématiques pour se mouvoir aisément dans cette technologie pourrait représenter un des freins essentiels. Les candidat.e.s ayant ce profil, cette appétence et ces capacités sont peu nombreux. Il est donc particulièrement difficile de les identifier. **Les formations doivent insister sur la maîtrise des fondamentaux et des concepts, et développer cette capacité à s'adapter** qui permettra aux professionnel.le.s, tout au long de leur carrière, d'évoluer.
Enfin, compte tenu du niveau d'exigence scientifique et des concepts utilisés par l'informatique quantique, nous ne pouvons que réitérer l'importance des softskills dans la formation générale des étudiant.e.s. En effet, ce sujet nécessite explication et promotion. Pédagogie et communication seront absolument nécessaires pour convaincre de manière proactive les différents acteurs de l'entreprise du potentiel disruptif de cette technologie, à anticiper.

Suivez toute l'actualité de Talents du Numérique sur le site www.talentsdunumerique.com
et nos réseaux sociaux www.talentsdunumerique.com/communaute
Contact : Rémi Ferrand (délégué général) - remi.ferrand@talentsdunumerique.com