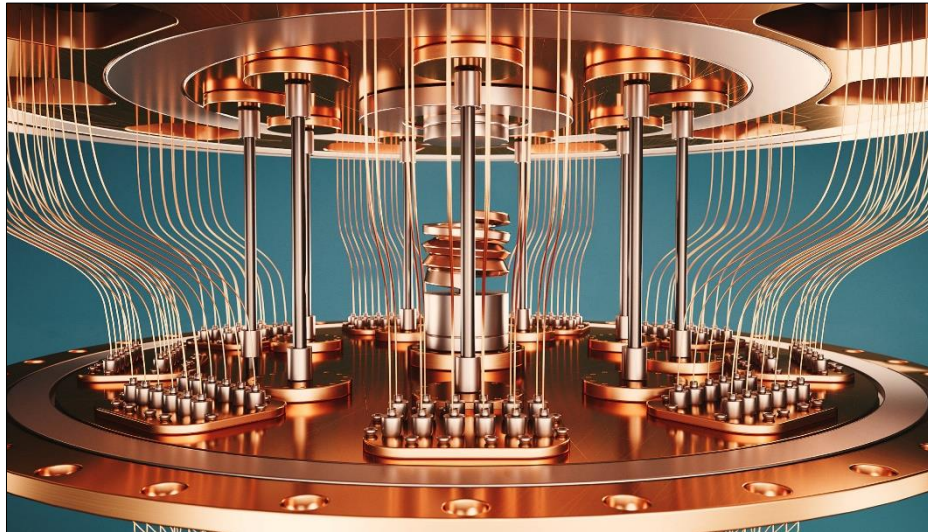


BTS Service informatique aux organisations option SLAM

Informatique quantique

À l'aube d'une nouvelle ère ?



FARINEL Sacha – Veille technologique

Table des matières

| | |
|---|---|
| Introduction | 2 |
| I. Qu'est-ce que « l'ordinateur quantique » | 2 |
| A. De quoi parle-t-on ? | 2 |
| B. Les concepts importants de la physique quantique | 3 |
| C. Les différences avec l'ordinateur classique | 4 |
| II. Les différentes applications possibles..... | 4 |
| A. Dans le domaine de la santé | 5 |
| B. Dans le secteur des finances | 5 |
| C. En matière d'Intelligence Artificielle | 6 |
| D. Et dans bien d'autres domaines | 6 |
| III. Les limites d'une telle technologie..... | 7 |
| A. La décohérence | 7 |
| B. Puissance de calcul et mémoire | 8 |
| C. L'éthique dans tout cela..... | 8 |
| Conclusion | 8 |
| Bibliographie..... | 9 |

Introduction

« *Si vous croyez comprendre la mécanique quantique, c'est que vous ne la comprenez pas¹* ».

Cette citation du physicien Richard Feynman résume à elle seule la complexité que représente le sujet de l'ordinateur quantique.

Depuis maintenant quelques années, cette technologie représente un enjeu de recherches majeur pour l'ensemble des acteurs du secteur.

Présenté parfois comme étant la solution miracle pour palier aux limites de calcul des supercalculateurs, l'ordinateur quantique permettrait de résoudre des problèmes physiquement insolubles pour un ordinateur dit « classique ».

Mais au juste, de quoi parle-t-on vraiment ? Quelle est la nature des problèmes qui peuvent être résolus avec un ordinateur quantique et qui ne peuvent pas l'être avec des ordinateurs classiques ? Et surtout, quelles sont les limites des ordinateurs quantiques ?

I. Qu'est-ce que « l'ordinateur quantique »

Connaissez-vous la première loi de Moore ? Vous savez celle qui dit « *que le nombre de transistors par circuit de même taille allait doubler, à prix constants, tous les ans²* » ? Elle a été corrigée peu de temps après par son auteur lui-même, en rapportant le délai à 18 mois. Depuis, nous nous sommes heurtés à un nouveau problème, et pas de moindre : une limite physique, celle de la taille d'un atome qui empêche plus de miniaturisation.

Avec l'avènement de l'ordinateur quantique, il convient d'oublier la loi de Moore car nous entrons dans une nouvelle ère, celle de la loi de Roze : « *La puissance de l'ordinateur quantique double tous les ans. À la différence près, et contrairement à la loi de Moore, que le doublement des qubits entraîne également une multiplication de la puissance de calcul des machines³* ».

Si nous voulons essayer de comprendre, nous allons devoir définir quelques « petits » concepts.

A. De quoi parle-t-on ?

Quand on parle d'ordinateur quantique, derrière il y a l'informatique quantique mais surtout ... la physique quantique. Celle-ci est « *un ensemble de théories physiques nées entre 1900 et 1930 et qui cherchent à expliquer le comportement des atomes et des particules⁴* ». Elle se différencie donc de la physique classique du fait de son approche à l'échelle de l'infiniment petit, atomique et subatomique, et des lois physiques qui y régissent ses mondes.

L'ordinateur quantique, appelé aussi « Calculateur quantique » utilise donc des procédés appartenant à la physique quantique comme la « superposition » et « l'intrication » (que nous approfondir à peu plus tard). Le but ? Effectuer des opérations sur des données à l'échelle atomique, ceci afin « *d'accélérer l'exécution de longues vagues d'instructions⁵* ».

¹ FEYNMAN Richard, physicien américain.

² Loi de Moore : qu'est-ce que c'est ? futura-sciences.com

³ L'informatique quantique, xenium-partners.fr, 23/05/2019

⁴ C'est quoi la physique quantique ? lejdd.fr, 01/2022

⁵ Tout comprendre à l'informatique quantique, zdnet.fr

Des premiers « petits » calculateurs quantiques voient le jour dans les années 1990, mais en rien semblable à ce qui existe de nos jours. En effet, jusqu'en 2008, « la difficulté majeure concerne la réalisation physique de l'élément de base : le qubit »⁶.

La première innovation notable est créée en 2009 à l'université Yale. Il s'agit du premier processeur quantique comportant deux qubits. Ceux-ci sont composés chacun d'un milliard d'atomes d'aluminium posés sur un support supraconducteur.

Si nous voulons comprendre pleinement ce qu'est l'ordinateur quantique et ce qu'est un Qubit par exemple, nous allons devoir expliquer des concepts importants qui régissent la physique quantique.

B. Les concepts importants de la physique quantique

Un des principes fondamentaux de la physique quantique qui s'applique à notre sujet est la superposition d'états. Nous avons tous plus ou moins entendu l'histoire du « **Chat de Schrödinger** ». Je vais résumer un peu l'histoire :

« Erwin Schrödinger, l'un des piliers de la physique quantique, a imaginé une expérience de pensée à base de boîte et de chat mort-vivant. Une expérience de pensée, c'est tenter de résoudre un problème en utilisant uniquement son imagination. C'est se poser la question : « que se passerait-il si... ? »

Le bon Erwin a donc imaginé l'expérience suivante : **il enferme son chat dans une boîte close**, contenant un dispositif qui tue l'animal dès qu'il détecte la désintégration d'un atome d'un corps radioactif. De l'extérieur, on ne peut pas savoir ce qui se passe dans la boîte. »⁷.



Figure 1: Représentation de l'expérience du chat de Schrödinger

Le but de cette expérience ? Confronter les gens au paradoxe de la physique quantique. Ce qu'il voulait prouver par celle-ci c'est qu'il n'y a aucun moyen de savoir si le chat est mort ou vivant avant d'avoir ouvert la boîte pour le constater. Avant ça, le chat est donc **mort ET vivant**. Bizarre, non ? En ouvrant la boîte, on fait apparaître un deuxième principe important de la physique quantique, « la **décohérence quantique** ». Mais quel est le rapport avec notre ordinateur quantique ?

Justement, cela marche exactement de la même manière. Dans un ordinateur quantique, il y a superposition d'états et c'est tout l'intérêt : « La superposition est la capacité contre-intuitive d'un objet quantique, comme un électron, à exister simultanément dans plusieurs "états" différents. Elle est littéralement dans ces différents états à la fois : à la fois dans un état et dans autre, sans faire une

⁶ Calculateur quantique, fr.wikipedia.org

⁷ L'histoire du Chat de Schrödinger expliquée simplement, institut-pandore.com, 23/01/2020

moyenne des deux. Une mesure détruira cette superposition, et ce n'est qu'alors que l'on pourra dire qu'il est dans l'état inférieur ou supérieur. »⁸

La « **mesure quantique** » est donc impossible entre deux choses dont la connaissance simultanée est impossible : « *Il est ainsi important de savoir ce que l'on mesure, sinon 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*⁹ ». De plus, en mesurant l'état d'une valeur, « les autres particules intriquées prennent instantanément la même valeur, indépendamment de la distance entre elles »¹⁰, c'est ce qu'on appelle « **l'intrication quantique** »

Ces concepts vont donc nous aider à comprendre la différence entre l'ordinateur quantique et l'ordinateur classique et de dessiner les points positifs et négatifs que celui-ci peut avoir.

C. Les différences avec l'ordinateur classique

Déjà, comment fonctionnent les ordinateurs conventionnels ? Ils sont programmés avec une unité qu'on appelle bit « *binary digit* ». Chaque bit peut avoir deux valeurs, 0 ou 1. Si je simplifie, 1 laisse passer l'électricité, 0 non. L'ordinateur quantique quant à lui fonctionne avec des Qubits.

Un Qubit est « *l'unité élémentaire pouvant porter une information quantique. Comme le 1 et le 0 sont les deux états d'un bit classique ordinaire, un qubit est la superposition cohérente d'au moins deux états de base quantiques, que l'on peut noter $|0\rangle$ et $|1\rangle$* ¹¹ ». Un Qubit peut donc avoir trois valeurs : « 0, 1 et une superposition quantique de 0 et 1¹² ».

Quel est donc le « *problème* » des ordinateurs classiques ? Ils sont limités « *lorsqu'ils se retrouvent confrontés à un problème de variables multiple. 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*¹³ ». Ce problème est pallié grâce au Qubit de l'ordinateur quantique. En effet, il va exploiter « l'intrication » 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 nulles (c'est-à-dire celles des mauvaises réponses)* ».

Maintenant que nous comprenons un peu mieux de quoi il s'agit, nous allons nous intéresser à ce que certains appellent la « révolution » que pourra apporter cette nouvelle technologie.

II. Les différentes applications possibles

Après avoir vu cela, nous pouvons nous dire : « Chouette, quand est-ce que cela va remplacer notre bon vieil ordinateur ? ». Alors ... ce n'est pas l'objectif du tout et encore moins tout de suite. Nous le verrons dans la partie suivante mais, l'ordinateur quantique n'est pas du tout fiable pour l'instant. L'entreprise Google « *espère avoir créé un ordinateur quantique capable d'effectuer des calculs à grande échelle et sans erreur, à la fois pour le monde scientifique et pour celui des entreprises. Un ordinateur « utile », qui servirait à débloquer des problèmes critiques* ».

⁸ Comment fonctionne un ordinateur quantique ? inria.fr, 16/10/2020

⁹ Ibid.

¹⁰ Intrication quantique : un étrange Aspect de la matière, radiofrance.fr, 14/05/2019

¹¹ Découvrir & comprendre – Le calcul et l'ordinateur quantique, cea.fr, 18/05/2021

¹² Le qubit en informatique quantique, microsoft.com, 2/05/2022

¹³ Comment fonctionne un ordinateur quantique ? inria.fr, 16/10/2020

des secteurs de l'environnement, la médecine, l'IA ou encore l'agriculture¹⁴ ». Les recherches fondamentales et appliquées en seront alors les premières bénéficiaires. L'état Français à présenter, début 2021, un « *plan quantique de 1,8 milliard d'euros pour faire de la France un leader du secteur*¹⁵ », mais en quoi cela pourrait révolutionner les activités de ces secteurs ?

A. Dans le domaine de la santé

L'avenir de l'informatique quantique est encore flou, mais elle révolutionnera le monde de la santé et plus particulièrement celui du médicament, enfin c'est ce que souhaite les entreprises qui emboîtent le pas afin de ne pas rater le départ de ce nouveau train prometteur et qui y mettent les moyens nécessaires.

C'est le cas de l'entreprise « Qubit Pharmaceuticals » qui travaille à « *découvrir des molécules qui viendront composer les médicaments de demain*¹⁶ ». L'avènement de l'ordinateur quantique pourrait, à terme, leur permettre de « *sauter la partie des tests en paillasse dans les laboratoires, grâce à la capacité de tout faire sur ordinateur. L'idée étant d'aller plus rapidement grâce aux calculs, avant d'arriver aux tests cliniques qui resteront nécessaires pour valider un traitement. Il faut savoir qu'aujourd'hui en matière de pharmacie, on est encore au stade du travail à l'ancienne où beaucoup d'éléments sont préparés avec des expériences classiques*¹⁷ ». L'entreprise compare la recherche en médicament de notre époque à celle des années 1950-1960 où l'on utilisait un ordinateur classique avec des cartes perforées.

Le but des « chimistes quantiques » de l'entreprise et de retranscrire, dans un langage compréhensible par l'ordinateur quantique, les équations utiles à leurs yeux, qui mettraient des dizaines d'années (voir beaucoup plus) à être résolu par un « supercalculateur ». Le but de tout cela est de « *pouvoir simuler des molécules et leur comportement chimique, afin de développer plus rapidement et plus précisément de nouveaux médicaments*¹⁸ ».

Ce n'est pas le tout de traduire des équations afin qu'elles soient compréhensibles par un processeur quantique, il faut aussi pouvoir comprendre la réponse fournie par celui-ci. Malheureusement, ce n'est pas toujours le cas.

B. Dans le secteur des finances

Un autre secteur ayant misé sur le domaine du quantique est la finance, mais pas pour les mêmes raisons et pas avec les mêmes objectifs. La société « JPMorgan Chase », aux Etats-Unis, « *fait partie des plus à la pointe quant au recours prochain aux calculateurs quantiques*¹⁹ ». Cette technologie leur permettrait « *d'accélérer de manière notable le traitement des données sur les actifs financiers*²⁰ ».

Des études ont mis en lumière que le processeur quantique pourrait être utilisé pour « *l'amélioration de la notation du crédit ou la détection des fraudes*²¹ ». De nos jours, des

¹⁴ Google espère commercialiser un « ordinateur quantique utile » d'ici 2029, numerama.com, 19/05/21

¹⁵ Santé, climat, économie, nucléaire : à quoi serviront les ordinateurs quantiques ? europe1.fr, 21/01/2021

¹⁶ Médicaments : Comment l'informatique quantique va révolutionner la recherche, cnews.fr, 25/01/2022

¹⁷ Ibid.

¹⁸ Roche mise sur l'informatique quantique pour soigner la maladie d'Alzheimer, ictjournal.ch, 03/02/2021

¹⁹ Informatique quantique : quel impact sur la finance ? journaldunet.com, 26/05/21

²⁰ Ibid.

²¹ Ibid.

algorithmes analysent déjà vos « réseaux sociaux et votre jardin²² » afin de détecter de potentielles infractions, imaginez avec la puissance de calcul des ordinateurs quantiques.

Enfin, les algorithmes quantiques pourraient aider les traders à « multiplier par quatre leur rendement en contribuant à prévoir le cours des actions cotées en Bourse²³ ». En effet, grâce à l'ordinateur quantique, les entreprises du secteur pourraient s'appuyer sur des outils beaucoup plus puissants afin de trier et d'analyser l'information afin d'optimiser les différents risques.

C. En matière d'Intelligence Artificielle

Comme nous l'avons vu, en augmentant le nombre de Qubits d'un processeur quantique, on augmente de façon exponentielle sa puissance (*chaque nouveau Qubit augmente la puissance de calcul par deux*). Cela ouvre des perspectives gigantesques en matière de « Machine Learning ».

C'est ce que pense Florian Carrière, manager en charge des technologies émergentes chez Wavestone. Il pense qu'un « *algorithme quantique basé sur une méthode probabiliste pourrait identifier des connexions autrefois impossibles à discerner. Un modèle de traitement automatique du langage comme GPT 3 compte déjà 175 milliards de paramètres d'apprentissage. On va pouvoir aller encore beaucoup plus loin. Ce qui va permettre de passer un nouveau gap en matière de traduction complexes ou d'analyse de sentiments²⁴* ».

C'est la même chose pour les réseaux de neurones. Ils pourront « *compulser des milliards de milliards de paramètres, en bénéficiant notamment des réseaux récurrents. La reconnaissance de formes et de scènes, dans le véhicule autonome par exemple, atteindra un degré de finesse et de précision inédit. Aux côtés de la taille de la mémoire quantique, l'avantage résidera, évidemment, dans l'accélération de la vitesse d'apprentissage²⁵* ».

Le quantique pourrait ainsi être l'une des solutions techniques pour faire entrer l'IA dans une nouvelle ère, grâce à la vitesse du quantique. Cela pourrait affecter un nombre de secteurs important comme « *l'Internet des Objets (IoT), le traitement du langage naturel, ou encore les véhicules autonomes, un domaine qui nécessite un ensemble de calculs intensifs, qui deviennent de plus en plus difficiles à mesurer que l'on ajoute des données et des relations plus complexes au sein des variables²⁶* ».

D. Et dans bien d'autres domaines

Comme vous vous en doutez, il y a un nombre de domaines non négligeables qui vont être bouleversés par l'arrivée, peut-être un jour, du processeur quantique. Je ne vais pas pouvoir tous les détailler ici, mais je peux en suggérer quelques-uns comme :

- **La cryptographie et la cybersécurité**, et pas d'une manière positive. En effet, de nos jours, avec les algorithmes de cryptage actuels, il est quasiment impossible qu'un ordinateur « *puisse résoudre le problème mathématique qui se cache derrière un chiffrement basé sur des clés bien dimensionnées²⁷* ». Ces algorithmes deviendront complètement inutiles quand l'ordinateur quantique sera plus stable. Il pourra casser n'importe quel

²² Comment le fisc espionne vos réseaux sociaux et votre jardin, lesechos.fr, 09/09/2021

²³ Informatique quantique : quel impact sur la finance ? journaldunet.com, 26/05/21

²⁴ Ce que l'informatique quantique va changer dans l'IA, journaldunet.com, 28/01/22

²⁵ Ibid.

²⁶ Sept domaines impactés par l'informatique quantique, inria.fr, 16/12/2020

²⁷ Ibid.

système et mettre en péril la sécurité de n'importe quelle infrastructure. Il faudra donc se pencher sur une nouvelle génération d'algorithme de cryptage quantique.

- **La météorologie** : En effet, elle se base de nos jours sur un nombre de variables gigantesque (pression atmosphérique, température, densité de l'air ...), ce qui rend les prévisions très difficiles à réaliser à moyen terme. En tant qu'individus, on ne rend pas compte à quel point que des secteurs entiers ont besoin de connaître ces résultats pour exercer leur activité (l'agriculture, l'élevage, le transport et la production d'énergie, ...).
- **La logistique** : Elle concerne l'ensemble des secteurs et repose aussi sur un grand nombre de variables, ce qui rend les algorithmes très compliqués. Les entreprises doivent donc réaliser des calculs longs et coûteux de surcroît pas toujours très fiable. L'ordinateur quantique n'aurait pas de problème à modéliser et analysée l'ensemble des données, plus rapidement. Cela aurait pour conséquence « *d'optimiser leur logistique et la planification des flux de travail associés à la gestion de leur chaîne d'approvisionnement*²⁸ ».

Enfin, ce qu'il faut retenir c'est que les problématiques qui pourraient être résolues grâce au quantique ne sont aujourd'hui pas toutes connues. C'est, entre autres, ce sur quoi les acteurs de la recherche travaillent aujourd'hui.

III. Les limites d'une telle technologie

Cela fait rêver, n'est-ce pas ? Dans la réalité, il va falloir lever de nombreux verrous avant que celui-ci ne puisse être utilisable un jour.

A. La décohérence

La décohérence quantique en est l'obstacle majeur. Nous avons vu que les principes de la superposition et l'intrication d'états sont utilisés par l'ordinateur quantique. Ils sont beaucoup plus sensibles à leur environnement que les états classique de l'ordinateur conventionnel. En effet, « *plus on va ajouter de qubits à un système, plus la quantité d'opérations parallèles va être augmentée et, par conséquent, la puissance de calcul également. On estime ainsi que près de 300 qubits parfaitement enchevêtrés en superposition pourraient cartographier toutes les informations de l'univers à partir du Big Bang*²⁹ », mais lorsque l'environnement interagit avec les qubits, cela va changer de manière incontrôlable leurs états quantiques. Les causes peuvent être multiples : les modifications des champs magnétiques et/ou électriques, le rayonnement d'objets chaud à proximité ou encore les interactions mêmes entre les différents qubits.

Le changement de leurs états entraîne par conséquent une perturbation du traitement de l'information. Les calculs ne sont donc pas fiables et comportent même des erreurs. De nos jours, les meilleurs processeurs quantiques commettraient une erreur sur 1000 opérations.

Le chercheur Zaki Leghtas, chercheur chez Inria Paris a affirmé : « *L'information dans un ordinateur est sans arrêt contaminée par des erreurs, explique le chercheur. Or dans le monde quantique, mesurer ces erreurs est extrêmement difficile car la mesure influence le paramètre*³⁰ »

²⁸ Ibid.

²⁹ Comment fonctionne un ordinateur quantique ? inria.fr, décembre 2020

³⁰ Ibid.

B. Puissance de calcul et mémoire

L'ordinateur quantique le plus puissant aujourd'hui ne dispose que de 65 qubits. Certes, c'est une prouesse, mais les chercheurs expliquent que, pour être réellement utilisable et rentable, il n'en faudrait pas moins de « 1,6 million pour obtenir un avantage financier³¹ ». Nous avons vu que précédemment, plus ont augmenté le nombre de Qubits, plus les interactions entre eux provoqués des erreurs de traitement.

Concernant la mémoire, « à l'heure actuelle, il est impossible de sauvegarder les états quantiques pour les charger ultérieurement. Un domaine de recherche se consacre particulièrement à la mémoire quantique (QRAM), afin de trouver un moyen de conserver des états quantiques en vue d'une utilisation ultérieure au sein de programmes quantiques³² ».

C. Et l'éthique dans tout cela ?

Chaque essor d'une nouvelle technologie apporte avec elle son lot de bénéfices, mais aussi de risques. Bien qu'à ses débuts, il faut déjà se pencher à ce que l'on pourra faire avec cette technologie. Bien sûr elle pourra être très utile dans des milieux fédérateurs comme la santé mais, « utilisée de façon abusive, cette technologie pourrait conduire à la création de nouvelles armes dévastatrices, ou à une manipulation néfaste du génome humain³³ ».

Le risque nucléaire n'est pas non plus une option à éviter, « cette technologie pourrait favoriser les interventions armées et miner la dissuasion nucléaire, ce qui pourrait faire ressurgir le spectre de la guerre nucléaire³⁴ ».

Même si ce n'est pas pour tout de suite, un consortium de scientifique du quantique voudrait « commencer à discuter dès à présent des avantages et des dangers potentiels que pourrait apporter cette technologie. Plus encore, ils estiment qu'il est indispensable de trouver un moyen de les équilibrer, et de les formuler à travers un code de conduite éthique³⁵ ».

Conclusion

Le XXIème siècle est sans nul doute celui de l'information. Si l'ordinateur conventionnel approche lentement de ses « limites », l'ordinateur quantique nous promet de s'en affranchir en nous offrant une puissance de calcul et un temps d'exécution inimaginables jusqu'à présent. La quantique et ses lois qui nous paraissent si étranges nous permettront peut-être de résoudre les problèmes les plus métaphysiques que se pose la science aujourd'hui à propos de l'esprit ou de l'univers. Car ses moyens nous permettent réellement d'appréhender des questions complexes, qu'aucun ordinateur conventionnel ne peut appréhender. Reste bien sûr à le programmer correctement, ce qui fera certainement l'objet de bien des années de durs labeurs. Mais un jour espérons-le, nous pourrons répondre à des questions qui sont aujourd'hui du ressort de la philosophie. Avec une telle motivation, on ne peut qu'encourager les chercheurs qui s'investissent dans cette voie royale et leur souhaiter de réussir leur entreprise.

³¹ L'informatique quantique vaut-elle vraiment le coup ? axa.com, 23/06/21

³² Ibid.

³³ Des scientifiques appellent à la création d'un guide éthique, siecledigital.fr, 02/02/21

³⁴ Drones, radars, nucléaire : comment le quantique va changer la guerre, numerama.com, 22/02/2020

³⁵ Des scientifiques appellent à la création d'un guide éthique, siecledigital.fr, 02/02/21

Bibliographie

B. (2022a, mai 3). *Le qubit en informatique quantique - Azure Quantum*. Microsoft Docs. <https://docs.microsoft.com/fr-fr/azure/quantum/concepts-the-qubit>

C. (2022b). *Le calcul et l'ordinateur quantiques*. CEA/Découvrir & Comprendre. <https://www.cea.fr/comprendre/Pages/nouvelles-technologies/essentiel-sur-ordinateur-quantique.aspx>

Cailleaud, N. (2022, 25 janvier). *Médicaments : comment l'informatique quantique va révolutionner la recherche*. CNEWS. <https://www.cnews.fr/vie-numerique/2022-01-25/medicaments-comment-linformatique-quantique-va-revolutionner-la-recherche>

Castro, V. (2020, 21 février). *Drones, radars, nucléaire : comment le quantique va changer la guerre*. Numerama. <https://www.numerama.com/politique/606950-drones-radars-nucleaire-comment-le-quantique-va-changer-la-guerre.html>

Comment fonctionne un ordinateur quantique ? (2020, 16 décembre). Inria. <https://www.inria.fr/fr/comment-fonctionne-un-ordinateur-quantique>

Crochet-Damais, A. (2022, 28 janvier). *Ce que l'informatique quantique va changer dans l'IA*. Journal du net. <https://www.journaldunet.com/solutions/dsi/1508407-ce-que-l-informatique-quantique-va-changer-dans-l-ia/>

F. (2022c). *Loi de Moore : qu'est-ce que c'est ?* Futura. <https://www.futura-sciences.com/tech/definitions/informatique-loi-moore-2447/>

George WOODMAN, G. W. (2021, 23 juin). *L'informatique quantique vaut-elle vraiment le coup ?* AXA. <https://www.axa.com/fr/insights/informatique-quantique-vaut-elle-vraiment-le-coup#:~:text=Les%20limites%20de%20l'informatique%20quantique%20peuvent%20%C3%AAtre%20r%C3%A9pertori%C3%A9es%20ainsi,que%20de%2065%20qubits%20physiques.>

Intrication quantique : un étrange Aspect de la matière. (2019, 14 mai). Radio France. <https://www.radiofrance.fr/franceculture/podcasts/la-methode-scientifique/intrication-quantique-un-etrange-aspect-de-la-matiere-4409536>

Jacob, J. (2021, 9 septembre). *Opinion | Comment le fisc espionne vos réseaux sociaux et votre jardin*. Les Echos. <https://www.lesechos.fr/idees-debats/cercle/opinion-comment-le-fisc-espionne-vos-reseaux-sociaux-et-votre-jardin-1344515>

Lahoud, I. (2021, 26 mai). *Informatique quantique : quel impact sur la finance ?* Journal du net. <https://www.journaldunet.com/economie/finance/1501571-informatique-quantique-quel-impact-sur-la-finance/>

Leprince-Ringuet, D. (2021, 8 septembre). *Tout comprendre à l'informatique quantique*. ZDNet France. <https://www.zdnet.fr/pratique/tout-comprendre-a-l-informatique-quantique-39891035.htm>

Lesaffre, C. (2021, 21 janvier). *Santé, climat, économie, nucléaire : à quoi serviront les ordinateurs quantiques ?* Europe 1. <https://www.europe1.fr/technologies/sante-climat-economie-nucleaire-a-quoi-serviront-les-ordinateurs-quantiques-4020045#:~:text=%22Un%20ordinateur%20quantique%20va%20pouvoir,de%20soins%20que%20de%20malades.%22>

Manens, F. (2021, 20 mai). *Google espère commercialiser un « ordinateur quantique utile » d'ici 2029*. Numerama. <https://www.numerama.com/tech/712570-google-espere-commercialiser-un-ordinateur-quantique-utile-dici-2029.html>

Partners, X. (2019, 23 mai). *L'informatique Quantique*. Xenium Partners. <https://xenium-partners.fr/etudes/informatique-quantique/>

Pimenta, J. (2021, 2 février). *Informatique quantique : des scientifiques appellent à la création d'un guide éthique*. Siècle Digital. <https://siecledigital.fr/2021/02/02/informatique-quantique-guide-ethique/>

Roche mise sur l'informatique quantique pour soigner la maladie d'Alzheimer. (2021, 3 février). ICTjournal. <https://www.ictjournal.ch/news/2021-02-03/roche-mise-sur-linformatique-quantique-pour-soigner-la-maladie-dalzheimer#:~:text=En%20collaboration%20avec%20l'%C3%A9diteur,contre%20la%20maladie%20d'Alzheimer.&text=Roche%20se%20positionne%20d%C3%A9j%C3%A0%20en,la%20d%C3%A9couverte%20de%20nouveaux%20m%C3%A9dicaments>.

S. (2020, 24 février). *L'histoire du Chat de Schrödinger expliquée simplement*. Institut Pandore. <https://www.institut-pandore.com/physique-quantique/chat-schrodinger-superposition-quantique/#:~:text=Schr%C3%B6dinger%20a%20propos%C3%A9%20cette%20exp%C3%A9rience,d'un%20chat%20tout%20mignon>.

Sept domaines impactés par l'informatique quantique. (2020, 16 décembre). Inria. <https://www.inria.fr/fr/domaines-informatique-quantique>

Vergnaud, V. (2021, 22 janvier). *C'est quoi la physique quantique?* lejdd.fr. <https://www.lejdd.fr/Societe/Sciences/cest-quoi-la-physique-quantique-4020234>

Wikipedia contributors. (2022a, avril 13). *Calculateur quantique*. Wikipédia. https://fr.wikipedia.org/wiki/Calculateur_quantique

Wikipedia contributors. (2022b, mai 4). *Richard Feynman*. Wikipédia. https://fr.wikipedia.org/wiki/Richard_Feynman