# Comprendre l'informatique quantique édition 2020

Comme il est de coutume avec nombre de mes ebooks, je les mets à jour à un rythme approximativement annuel, en particulier sur deux thèmes liés aux deep techs : l'intelligence artificielle et l'informatique quantique.

Vous avez sûrement remarqué que je n'ai pas publié au printemps 2020 de nouvelle édition du Guide des Startups que je mettais à jour régulièrement depuis 2006. J'ai fait une pause liée à la pandémie du covid-19, me disant qu'une réactualisation en plein confinement risquait d'être périmée à peine publiée. L'économie est tellement secouée que nombre de briques de l'écosystème risquent d'être déstabilisées.

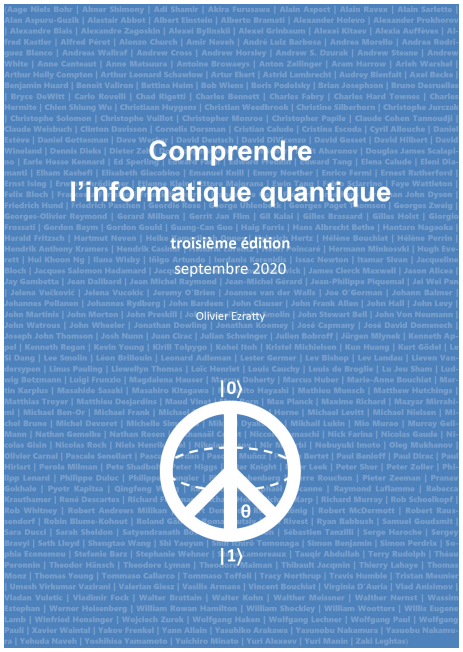
J'ai donc choisi de mettre à profit cette période et l'été qui a suivi pour mettre à jour mon ebook sur l'informatique quantique. Pas par défaut mais aussi par goût. À la fois pour pouvoir continuer d'explorer ce vaste champ scientifique mais aussi pour profiter de nombreux contacts existants ou nouveaux établis avec les acteurs du domaine. J'y ai investi énormément de temps, compulsé un nombre incroyable de documents (>1500) et aussi rencontré, réellement et surtout à distance, un bon nombre de chercheurs et entrepreneurs des technologies quantiques. Cela s'intégrait par ailleurs très bien dans la série de podcasts **Decode Quantum** lancée en mars 2020 avec Fanny Bouton et Richard Menneveux de Frenchweb / Decode Media et les podcasts sur l'actualité quantique **Quantum** avec Fanny depuis septembre 2019.

Cette nouvelle édition de l'ebook est encore plus inédite que les deux précédentes, par la couverture à 360° du sujet sous tous les angles : historique, scientifique, technologique, ingénierie, matériel, logiciel, entrepreneurial, géopolitique, philosophique et sociétal. Elle se distingue vis à vis des nombreux ouvrages qui sont publiés sur le sujet, y compris en anglais, par la dimension ingénierie que j'ai approfondie.

Cette édition fera donc le bonheur des ingénieurs et techniciens curieux de découvrir le fonctionnement les ordinateurs quantiques de la tête aux pieds et en particulier dans leurs composantes non quantiques comme la cryogénie ou l'électronique de commande. Heureusement, d'autres parties moins techniques sont aussi là pour les lecteurs moins avertis. Cet ouvrage est destiné à un public curieux et plutôt scientifique. Comme l'indique une grille de lecture en début de document, certaines parties sont abordables pour des publics généralistes, d'autres nécessitent un background scientifique plus solide, ou tout du moins, du temps pour assimiler les concepts. Ce d'autant plus que je fournis de nombreuses références bibliographiques à compulser. Le public idéal ? Les étudiants de l'enseignement supérieur scientifique qui voudraient découvrir en mode grand angle ce vaste domaine. Puis les étudiants attardés que tous les autres devraient rester !

Cette nouvelle édition fait 682 pages à comparer aux 504 de la précédente. Et encore, j'ai légèrement diminué la taille de la police de caractères pour l'aligner sur celle de mes autres ouvrages.

**Attention** : cette édition est dépassée et est remplacée par **l'édition 2024** publiée en septembre 2024 (en anglais, sans version en français).




L'ebook est aussi **téléchargeable sur ce lien**, en cliquant sur la couverture du rapport *ci-dessous* ou sur le bouton *ci-dessus* !

**Télécharger Comprendre l'Informatique Quantique 2020**

Le PDF fait 62 Mo dans sa version standard et vous pouvez aussi récupérer une **version plus compressée** de 25 Mo utile si vous souhaitez le consulter sur certaines liseuses qui limitent la taille des PDF consultables ou si vous avez fait vœu de sobriété numérique.

L'édition courante a toujours le même nom de fichier et lien. Cela permet aux lecteurs qui tombent sur les articles annonçant les deux dernières éditions de toujours récupérer la dernière. L'**édition de 2019** est toujours disponible avec un autre nom de fichier, si vous voulez apprécier la différence.

**Nouveautés**

Cette édition 2020 est une très grosse refonte. Elle comprend 70% de contenu supplémentaire et presque la totalité du contenu existant de l'édition 2019 a été revue, corrigée et complétée.

Voici donc ce que vous réserve ce cru que vous lirez probablement par morceaux :

- Approfondissement de **l'histoire de la physique quantique** en apportant quelques détails de vulgarisation sur les équations de **Maxwell**, sur la **fonction d'onde de Schrödinger** que je décompose pour comprendre ce qu'elle contient et qui y sont les variables et les inconnues (ce qui est utile pour une équation…), au sujet de **Paul Dirac** et de la mécanique quantique relativiste et de ses implications dans la chimie quantique relativiste et dans la physique des particules ainsi que sur **Wolfgang Pauli** et la découverte du spin de l'électron.

- Nouvelle rubrique sur la **recherche en général et ses codes** qui est une sorte de rapport d'étonnement sur les pratiques de ce milieu, finalement assez méconnu dans l'écosystème du numérique.

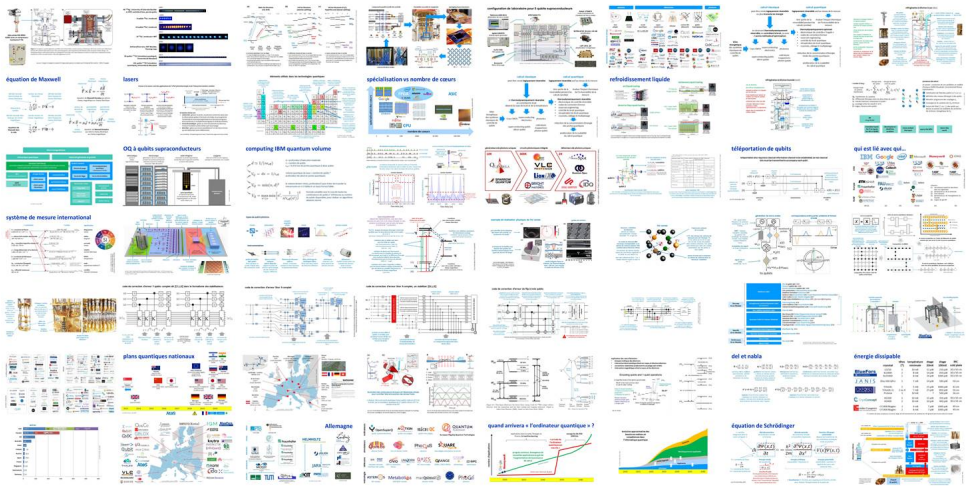
- Ajout d'une rubrique sur le fonctionnement des **masers et des lasers** et leurs liens avec les technologies quantiques.

- Ajout d'une rubrique sur les **polaritons**, un domaine méconnu de la physique quantique qui impacte à la

fois le calcul quantique et la métrologie quantique.

- Ajout d'une rubrique sur le **quantique extrême** avec la théorie quantique des champs, les fluctuations quantiques du vide et les théories de l'unification. C'est de la culture générale scientifique.
- Compléments sur l'**algèbre linéaire** et les notions de **non-linéarités** utilisées dans les technologies quantiques avec notamment ces objets mathématiques étranges que sont les laplaciens, les lagrangiens, les permanents et les déterminants.
- Nouvelle rédaction et nombreux compléments pédagogiques sur les **codes de correction d'erreurs**, sur l'ingénierie de la **cryogénie** et sur les **composants électroniques** de contrôle des calculateurs quantiques. Tout cela comporte une belle partie d'ingénierie généraliste.
- Je détaille aussi le fonctionnement du **Measurement Based Quantum Computing** (MBQC), une méthode alternative de calcul quantique assez originale étroitement associée aux qubits photons.
- Nouvelle partie sur les **matières premières** des technologies quantiques, leur nature, leur origine et leur procédé de fabrication. Un sujet rarement traité dans ce créneau. Et une découverte : une relative faible dépendance de la Chine comme source d'approvisionnement.
- Un nouvelle rubrique sur les **aspects énergétiques et de scalabilité** du calcul quantique, rarement traitée.
- Ajout d'une rubrique sur les **offres de cloud quantique**, intégrant celles d'Amazon et de Microsoft.
- Approfondissement scientifique et révision complète de toutes les parties sur les **technologies de qubits** et les acteurs du marché correspondants.
- Regroupement des technologies alternatives au calcul quantique dans un **chapitre dédié**, avec Fujitsu, MemComputing, Hawai, sur les ordinateurs supraconducteurs, le calcul réversible et adiabatique, les processeurs statistiques, les processeurs optiques et les supercalculateurs.
- Ajout de plus de **100 nouvelles startups et PME** dans le calcul quantique, les technologies habilitantes, les télécommunications, la cryptographie et la métrologie.
- Mise à jour de la partie sur la **métrologie** avec ajout de NEMS/MEMS et de la mesure de radiofréquences.
- Mises à jour sur les investissements dans les **technologies quantiques dans le monde** avec en particulier : USA, Chine, Canada, UK, Allemagne, Israël, Allemagne, Pays Bas, Australie, Japon et Singapour. Ajout de la Suède, de l'Inde et de Taiwan.
- Ajout de nouvelles rubriques sur l'influence de la **science-fiction** et sur la **philosophie de la physique quantique**.
- Ajouts divers sur les **fausses sciences du quantique** en particulier dans le champ de la santé.

L'ebook contient aussi des dizaines de nouveaux schémas explicatifs associés à ces parties et dont voici un aperçu !



**Remerciements**

Cet ebook n’aurait pas vu le jour sans des rencontres et des contributions actives de correcteurs et “fact-checkers”, surtout scientifiques.

La période covid a été l’occasion de rencontrer, le plus souvent à distance, un grand nombre de chercheurs et entrepreneurs du secteur. Je remercie notamment côté recherche : **Alain Aspect** (Institut d’Optique), **Artur Ekert** (CQT Singapour), **Patrice Bertet** (CEA), **Xavier Waintal** (CEA IRIG), **Yvain Thonnart** (CEA LIST), **Rob Whitney** (LPMMC Grenoble), **Elham Kashefi** (CNRS LIP6), **Damian Markham** (CNRS LIP6 et JFLI à Tokyo), **Pascale Senellart** (C2N) et **Maud Vinet** (CEA-Leti) et côté entrepreneuriat : **Bruno Desruelle** (Muquans), **Georges-Olivier Raymond** et **Antoine Browaeys** (Pasqal), **Théau Perronnin** et **Raphaël Lascanne** (Alice&Bob) ainsi que **Matthieu Desjardins** (C12), **Jeremy O’Brien** (PsiQuantum), **Magdalena Hauser** et **Wolfgang Lechner** (ParityQC) et **Roger MKinley** (UKRI).

Cette troisième édition a bénéficié de la relecture transversale de **Michel Kurek, Bruno Fedrici** et **Peter Eid**, de la contribution de **Pierre Perrot** (CryoConcept) pour la partie cryogénie, de celle de **Neil Abroug** (CEA) sur le fonctionnement de la recherche, les classes de complexité et les plans industriels, de **Valérian Giesz** (Quandela) sur les parties consacrées à la photonique, d’**Alexia Auffèves** pour les parties sur la cryogénie, sur l’énergie, sur le fonctionnement de la recherche et sur la philosophie quantique, de **Marco Fellous-Asiani** (CNRS Institut Néel) pour la correction d’erreurs, la cryogénie et l’énergie, d’**Elham Kashefi** (CNRS LIP6 et VeriQloud) sur le MBQC, de **Maxime Richard** (CNRS Institut Néel) sur les polaritons et les fluctuations quantiques du vide, et d’**Eleni Diamanti** (CNRS LIP6) pour la partie sur les télécommunications et la cryptographie quantiques.

C’est bien mais ce n’est pas assez ! Malgré tout ça, il subsiste toujours des erreurs dans un ouvrage de cette taille. Ne serait-ce que parce que toutes ses parties n’ont pas bénéficié du même niveau de relecture par des spécialistes. J’ai trouvé plein d’erreurs dans l’édition précédente, que, pour certaines, j’ai corrigées au fil de l’eau. Vous pouvez donc me signaler par mail toute erreur, et même commenter le PDF et me le retourner. Cela me permettra de publier des “silent release” corrigées de l’ebook.

**Rapport d’étonnement et synthèse**

J’en connais qui vont me demander un résumé en quelques lignes des 682 pages du bouquin. Genre, le quantique à la sauce Twitter.

Je vous propose plusieurs solutions :

Pour commencer, si vous êtes très pressés, vous pourrez parcourir la table des matières commentée située entre

les pages 11 et 14.

Ensuite, vous pourrez écouter le **18e épisode de la série de podcasts Quantum** que j'enregistre régulièrement avec Fanny Bouton et qui traite essentiellement de cet ebook et de son "making of". Avec en prime quelques anecdotes sur le film Tenet.

Enfin, en complément, voici ce qui m'a le plus étonné lors de la rédaction de cette troisième édition.

Tout d'abord, l'importance de l'**ingénierie intégrative** pour faire avancer toutes les branches des technologies quantiques et notamment le calcul quantique. Le chemin qui mène à la création d'ordinateurs quantiques "scalables" est à la fois un défi scientifique et d'ingénierie couvrant un très grand nombre de disciplines. Parmi celles-ci se trouvent des disciplines plus traditionnelles, comme la cryogénie, l'électronique fonctionnant à basse température ou la production de matériaux innovants. Tout est lié !

J'ai pu creuser les tenants et aboutissants de la **complexité de la mise au point** de ces ordinateurs quantiques scalables (dits "LSQC" pour large scale quantum computers, ou LSQ pour faire plus court). L'épineuse question du bruit et de la correction d'erreur. Les contraintes thermodynamiques, en particulier avec les qubits supraconducteurs et silicium. Celles de la production de semi-conducteurs de qualité pour les qubits silicium et en nanophotonique. Et aussi des problèmes de câblage en tout genre. Cette complexité explique le scepticisme de certains. Mais je suis rassuré en découvrant les travaux de nombreux chercheurs et entrepreneurs dans le monde et l'ingéniosité humaine infinie qui s'exerce ici comme ailleurs.

Le troisième couvre les spécificités de l'**écosystème entrepreneurial quantique**. Dans le monde entier, des startups se lancent, le plus souvent créées par des chercheurs et avec des niveaux de "TRL" assez bas par rapport aux deep techs habituelles. Le Technology Readiness Level qualifie le niveau de maturité d'une technologie entre recherche fondamentale et commercialisation. C'est une règle du jeu un peu nouvelle à laquelle il faut nous adapter en France.

Le quatrième est l'**importance stratégique** que les technologies quantiques ont prise au niveau des pays développés. Il y a maintenant autant de plans étatiques formalisés sur le quantique que sur l'intelligence artificielle. C'est lié à un tas de facteur : le risque que le calcul quantique fait peser à terme sur la cryptographie classique d'aujourd'hui, les velléités de ne pas être trop dépendant de pays comme les USA ou la Chine (et ces deux-là même, entre eux) et une forme de redécouverte du long terme par les États. Le covid-19 n'a fait qu'amplifier cette tendance déjà entamée avant.

Le dernier point est que ce **sujet reste complexe**. Si vous saviez l'immensité de ce que je n'ai pas encore compris malgré ces presque 700 pages ! C'est un exercice d'humilité permanent et une quête infinie. Comme un puzzle de la Joconde qui se construit petit à petit, je commence à la reconnaître, même si les nuances du sfumato quantique m'échappent encore. Je félicite d'ailleurs ceux et celles qui tentent d'améliorer la pédagogie du quantique, que je cite dans l'ouvrage. La complexité se retrouve aussi dans la difficulté à décoder ce que fait une simple startup. La traduction en langage naturel de l'actualité est presque une activité à temps plein.

Et au fait, on dit "la quantique" ou "le quantique" ? La réponse, circonstanciée, se trouve dans l'ebook !

Bonne lecture les ami(e)s !

Cet article a été publié le 7 septembre 2020 et édité en PDF le 7 octobre 2024.
(cc) Olivier Ezratty – “Opinions Libres” – **https://www.oezratty.net**