



# Opinions Libres

le blog d'Olivier Ezratty

## Comprendre l'informatique quantique – scientifiques

Après avoir posé le décor et le sommaire de cette série d'articles sur l'informatique quantique, nous allons faire un petit retour en arrière pour comprendre la riche histoire de cette discipline.

Chaque épopée scientifique et technologique est avant tout une grande Histoire humaine. Celles de la mécanique quantique et de l'informatique quantique n'y échappent pas. Je vais ici rendre hommage aux grands scientifiques qui ont rendu tout cela possible et continuent encore de plancher dessus pour ceux qui sont encore de ce monde.

La physique ou mécanique quantique s'intéresse à l'infiniment petit et à ses différences par rapport à la mécanique classique, souvent dite newtonienne, qui régit de manière prédictible le fonctionnement des objets de taille raisonnable, au-delà de quelques microns jusqu'à la taille des planètes et des étoiles. Dans l'infiniment grand, on fait appel à la théorie de la relativité et à son lien avec la gravitation qui explique la courbure de l'espace-temps. Elle est indispensable pour interpréter les phénomènes extrêmes que sont les trous noirs ou les étoiles à neutrons. Elle permet d'interpréter l'Histoire de l'Univers, mais pas entièrement.

La physique n'est toujours pas complète ni totalement unifiée. Certains phénomènes physiques observables lui résistent encore. On ne sait pas expliquer précisément l'origine précise de la gravitation et on cherche toujours la matière et l'énergie noires qui expliqueraient la cohésion des galaxies. L'Homme aimerait bien tout savoir et tout expliquer mais il est fort probable que cette quête sera toujours en devenir, ne serait-ce que sur la forme qu'avait l'Univers avant le big bang.

Vous pouvez passer cette partie et aller directement à la suivante si l'Histoire des sciences ne vous intéresse pas. Cette partie sert surtout de référence pour bien mémoriser qui est qui dans l'Histoire de la mécanique et de l'informatique quantiques.

J'ai rédigé cette partie au gré de mes découvertes dans la rédaction de l'ensemble des parties de cette série d'articles. J'y apporterai certainement des retouches au fil de l'eau pendant l'été 2018 au gré de la finalisation de cette série d'articles.

### Les scientifiques de la mécanique quantique

Un topo sur l'informatique quantique démarre inmanquablement par un "101" de la mécanique quantique. Il requiert de couvrir quelques basiques, même s'ils sont parfois abstraits. Mon objectif sera de raccommoder les morceaux avec le fonctionnement pratique des ordinateurs quantiques. Comprendre la mécanique et l'informatique quantique relève de l'assemblage d'un vaste puzzle. On ajoute les pièces une par une. Le puzzle n'est jamais complet. Au bout d'un certain temps, on y voit une image qui permet d'avoir une vue d'ensemble sans forcément que le puzzle soit terminé. C'est ce qui vous arrivera probablement au terme de la lecture de ces articles.

La physique quantique est une science qui a pris forme aux débuts du 20<sup>e</sup> siècle. Malgré ses enrichissements constants, elle a fait preuve d'une étonnante solidité pour résister à l'épreuve du temps. Comme presque toutes les sciences, elle résulte des travaux de très nombreux scientifiques et chercheurs. L'histoire des idées de la mécanique quantique est une aventure humaine qui a rassemblé des talents immenses qui se sont confrontés, qui ont fait évoluer pas à pas leur compréhension de l'infiniment petit.

Comme souvent, cette compréhension a associé des physiciens et des mathématiciens. Les physiciens ont mené de nombreuses expériences pour identifier des paradoxes, des inconnues, bâtir des théories puis les vérifier par l'expérience, parfois avec plusieurs décennies de latence. Les mathématiciens ont bâti des modèles de représentation des données, comme les matrices et l'algèbre linéaire, qui jouent un très grand rôle dans la mécanique quantique pour décrire les états des quantums et leur évolution dans l'espace et dans le temps. Cette algèbre linéaire est au cœur du fonctionnement des qubits des ordinateurs quantiques. Très souvent, les représentations mathématiques de la physique quantique dépassent les interprétations physiques.

Nombre de ces scientifiques ont laissé une trace mémorable connue des connaisseurs voire même du grand public avec le célèbre chat de Schrödinger et le principe d'indétermination d'Heisenberg. Comme souvent, d'autres contributeurs moins connus ont aussi apporté leur pierre à l'édifice et il faut aussi leur rendre hommage.

Vous n'y trouverez pas d'inventeur à la Roland Moreno ou d'entrepreneur sauce Steve Jobs ou Elon Musk, même si les fondateurs de startups telles que le Canadien D-Wave aspirent à obtenir ce statut.

Ce côté collectif de la mécanique quantique est incarné par l'épisode mythique du cinquième **Congrès de Physique Solvay de 1927**, tenu à Bruxelles à l'hôtel Métropole. Il rassemblait les plus grands mathématiciens et physiciens de l'époque dont presque tous les pères de la mécanique quantique avec Bohr, Schrödinger, Born, de Broglie, Heisenberg, Planck, Dirac et Einstein. Les congrès Solvay ont lieu tous les 3 à 4 ans. La dernière édition, 27<sup>e</sup> du genre, eu lieu en 2017. Ils sont thématiques. Celui de 1927 portait sur les électrons et les photons, au cœur de la mécanique quantique. Un congrès sur deux portait sur la mécanique quantique, le dernier du genre ayant eu lieu en 2011.



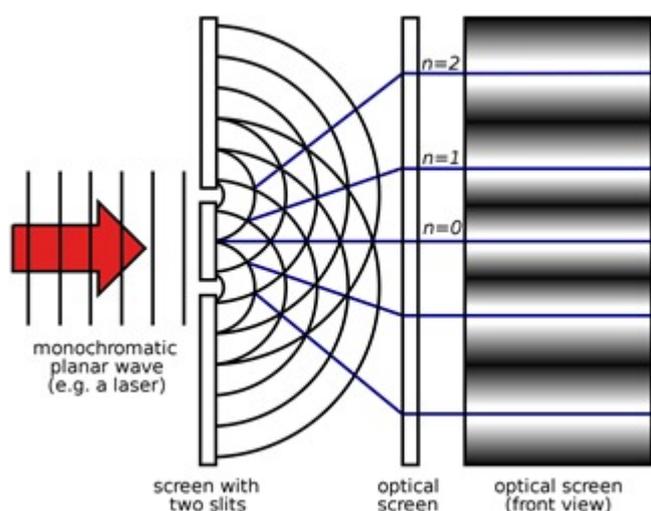
Voici donc quelques-uns de ces protagonistes et leurs grandes contributions associées avec au passage, des indications de qui a influencé qui, les contributions étant généralement organisées par ordre chronologique.

### Quelques précurseurs de la mécanique quantique

Nous commençons avec les physiciens et mathématiciens qui ont posé des bases scientifiques qui ont permis à leurs successeurs du 20e siècle de formaliser les bases de la physique quantique. Notez que je n'indique pas toujours la source des schémas. Ils font partie d'explications scientifiques courantes qui font maintenant partie du domaine public.



**Thomas Young** (1773-1829, Anglais) détermine la nature ondulatoire de la lumière. Il la prouve avec l'expérience des doubles fentes dites de Young vers 1806, illustrée *ci-dessous*. Elle génère des interférences qui créent une illumination alternant lumière et absence de lumière liée à la nature ondulatoire de la lumière. Ce grand spécialiste de l'optique a aussi travaillé sur les principes de la réfraction et de la vision trichromatique. Son expérience a été rééditée avec des électrons, en 1927, avec un résultat voisin, illustrant la dualité onde-particule de l'électron, résultat des travaux du Français Louis de Broglie.



**William Rowan Hamilton** (1805-1865, Irlandais) est un mathématicien et astronome. Vers 1827, il invente de nouvelles formulations mathématiques des lois de la physique qui intègrent l'électromagnétisme. En mécanique quantique, on parle souvent d'Hamiltonien ou de fonction hamiltonienne. Il s'agit d'équations servant à décrire l'énergie totale et potentielle d'un système de particules élémentaires (**détails**). L'équation de Schrödinger créée en 1926 décrit l'évolution dans le temps d'un hamiltonien. Ce concept est notamment utilisé dans les ordinateurs quantiques à recuit quantique de D-Wave que nous aurons l'occasion de décrire dans le détail dans une partie à venir.

**Niels Henrik Abel** (1802-1829, Norvégien) est un mathématicien à l'origine de ce que l'on appelle les groupes abéliens. Il est mort à 26 ans de la tuberculose ! C'est bien dommage pour un tel génie ! Ses travaux portent sur la semi-convergence des séries numériques, des suites et séries de fonctions, les critères de convergence d'intégrale généralisée, sur la notion d'intégrale elliptique et sur la résolution d'équations algébriques. Avec Hamilton et Hermite, c'est l'un des fournisseurs des fondements mathématiques utilisés dans la mécanique quantique. L'appellation "abéliens" et "non abéliens" est associée aux anyons, les quasi-particules qui sont la

base de l'informatique quantique topologique. Pourquoi ces concepts de mécanique quantiques inventés bien avant sa mort font-ils référence à ce mathématicien ? Notamment parce que la distinction entre abéliens et non abéliens est liée à leur représentation mathématique commutative (= "abélien", quand  $A*B = B*A$ ) ou non commutative ("non abélien", lorsque  $A*B$  n'est pas égal à  $B*A$ ) !

**Charles Hermite** (1822-1901, Français) est un mathématicien très prolifique, qui a fait avancer la théorie des nombres, les formes quadratiques, la théorie des invariants, les polynômes orthogonaux, les fonctions elliptiques et l'algèbre. Ses principaux travaux sont concentrés sur la période 1848-1860. On lui doit la notion d'hermitiens, une notation mathématique utilisée en mécanique quantique et l'explication va s'arrêter là car après, c'est bien trop compliqué. Les matrices hermitiennes sont des matrices composées de nombres réels dans la diagonale et pouvant être complexes dans le reste, et qui sont égales à leur transposée conjuguée. À savoir, leur transposée dont on a inversé la valeur des nombres complexes ( $i$  devient  $-i$ ). Voir l'exemple *ci-dessous*. Les matrices décrivant les opérations des portes quantiques dans les ordinateurs quantiques sont des matrices hermitiennes. Elles ne changent pas la longueur des vecteurs qui sont transformés par ces matrices.

$$A = \begin{pmatrix} 3 & i & -5i \\ -i & -2 & 5 \\ 5i & 5 & 10 \end{pmatrix} \text{ est une matrice hermitienne :}$$

$$\bar{A} = \begin{pmatrix} 3 & -i & 5i \\ i & -2 & 5 \\ -5i & 5 & 10 \end{pmatrix} \text{ et } (\bar{A})^T = \begin{pmatrix} 3 & i & -5i \\ -i & -2 & 5 \\ 5i & 5 & 10 \end{pmatrix} = A$$

**James Clerk Maxwell** (1831-1879, Écossais) est le créateur en 1865 de la théorie des champs électromagnétiques, associant un champ électrique et un champ magnétique orthogonaux comme dans le schéma *ci-dessous*, se déplaçant à la vitesse de la lumière. Il est aussi à l'origine de la loi de distribution des gaz Maxwell-Boltzmann. On lui doit enfin la création de pistes de création de la photographie en couleurs s'appuyant sur les trois couleurs primaires de la vision humaine. Sa description des ondes électromagnétiques va avoir un impact phénoménal dans les télécommunications électromagnétiques et dans l'optique. Cela servira de fondements à la mécanique quantique élaborée en premier par Max Planck en 1900.



**Ludwig Boltzmann** (1844-1906, Autrichien) est un physicien, père de la physique statistique, défenseur de l'existence des atomes et créateur d'équations décrivant la dynamique des fluides et des gaz en 1872. Dépressif, il est mort en se suicidant !

**Henri Poincaré** (1854-1912, Français) est un mathématicien et physicien, précurseur de la théorie de la relativité, et des ondes gravitationnelles. C'était un cousin germain de Raymond Poincaré, président de la République Française pendant la première guerre mondiale. On lui doit une fonction probabiliste qui porte son nom et qui est l'équivalent en optique de la représentation de Bloch que nous verrons plus tard et qui est un fondement de la description mathématique de l'état des qubits des ordinateurs quantiques.

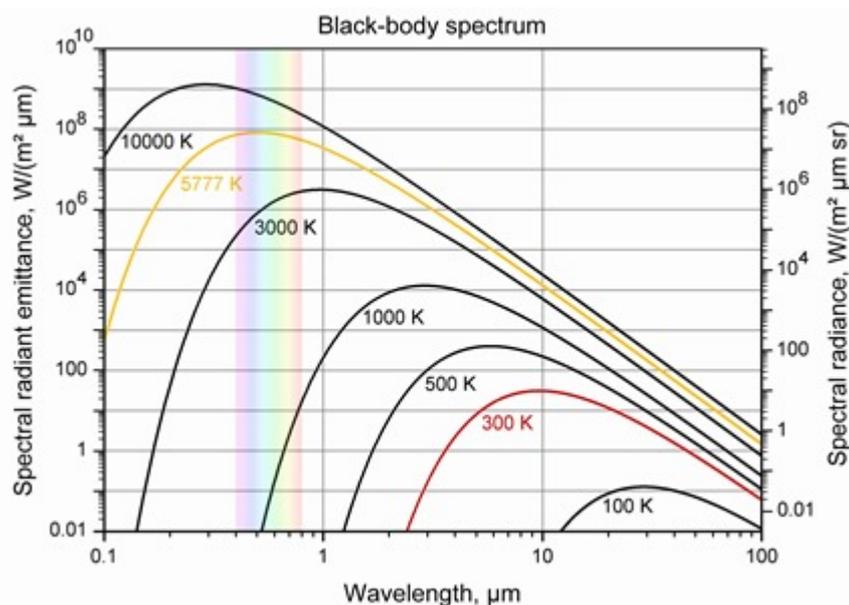
**David Hilbert** (1862-1943, Allemand) est un mathématicien prolifique à qui l'on doit à la fin du 19<sup>e</sup> siècle les fondamentaux mathématiques de la mécanique quantique, et notamment ses espaces dits de Hilbert utilisant des vecteurs permettant de mesurer des longueurs, des angles et de définir des orthogonalités. On les utilise pour représenter l'état des qubits avec des vecteurs ou nombres complexes. Ses travaux n'avaient cependant rien à voir à l'origine avec la mécanique quantique qui n'était alors pas encore formulée.

## Les créateurs

La mécanique quantique a vu le jour avec Max Planck, puis a pris forme sur trois décennies et demies, en gros jusqu'en 1935 avec les contributions successives d'Einstein, Bohr, De Broglie, Born, Schrödinger et Heisenberg pour ne prendre que les plus connues. Voici donc un tour des grands physiciens et mathématiciens qui ont établi les bases de la physique quantique. Ce sont tous des européens qui vont pour une bonne part s'expatrier aux USA avant la seconde guerre mondiale.

**Max Planck** (1858-1947, Allemand) est un physicien, initialement spécialisé dans la thermodynamique. En 1900, il imagine la théorie des quantas, émettant l'hypothèse que le rayonnement de la matière n'est pas continu mais varie par seuils, par paliers d'une certaine quantité d'énergie, d'où le terme de "quanta" et de "physique quantique". Sa théorie lui permet d'expliquer pour la première fois l'énigmatique rayonnement du corps noir, un corps qui absorbe tout rayonnement magnétique incident.

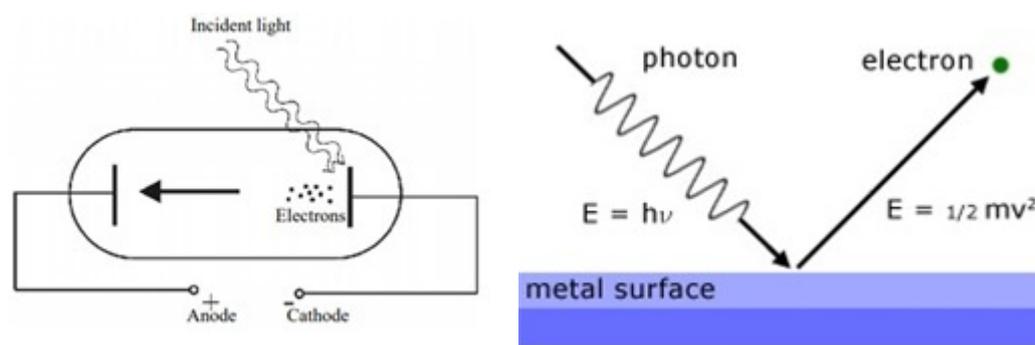
Les exemples de corps noir sont une cavité fermée comme un four, un métal chauffé qui devient rouge, orangé, puis blanc en fonction de la température, ou une étoile comme le Soleil. Le spectre d'ondes électromagnétiques émis par un corps noir dépend uniquement de sa température selon le schéma *ci-dessous* et pas du tout de sa matière. Plus la température est élevée, plus le spectre électromagnétique émis par le corps noir glisse vers les fréquences élevées, donc vers le violet et l'ultra-violet avec l'augmentation de la température. Max Planck élabore une formule décrivant le spectre électromagnétique du corps noir qui est rapidement vérifiées par l'expérience. Il devient prix Nobel de physique en 1918. Etienne Klein raconte bien le cheminement intellectuel de Max Planck dans la vidéo "La naissance de la physique quantique" (2016).



Max Planck est ainsi l'un des premiers à formuler les bases de la mécanique quantique. On lui doit également la constante qui porte son nom et qui est exploitée dans son explication du rayonnement d'un corps noir. Cette constante fut ensuite utilisée dans l'équation selon laquelle l'énergie du changement d'état d'un atome égale la fréquence du rayonnement multipliée par la constante de Planck. Lorsqu'un électron change d'orbite dans un atome d'hydrogène, cela émet ou absorbe une onde électromagnétique dont l'énergie est égale à la constante de Planck multipliée par la fréquence lumineuse émise. Bien qu'Albert Einstein, Niels Bohr et d'autres réalisèrent quelques années plus tard des vérifications physiques de la théorie quantique, Planck exprima jusqu'à sa mort des doutes sur les principes de la mécanique quantique !

**Albert Einstein** (1879-1955, Allemand puis Américain) est un physicien que l'on ne présente plus, prix Nobel

en 1921 pour son interprétation de l'effet photoélectrique en 1905, qui est devenue l'un des fondements de la mécanique quantique. Dans **“On a Heuristic Viewpoint Concerning the Production and Transformation of Light”**, il détermine que les quantas de Planck sont des photons, des quantités discrètes d'énergie lumineuse, dont l'énergie est égale à la fréquence électromagnétique des ondes transportées multipliée par la constante de Planck. L'effet photoélectrique est aussi à l'origine du solaire photovoltaïque et des principes de la photosynthèse dans les plantes, qui permet la production de glucose. Il correspond à la capacité d'un photon à déloger un électron de l'orbite extérieure d'un atome et de créer du courant électrique.



L'interprétation d'Einstein s'appuyait sur les travaux antérieurs de **Heinrich Hertz** (1857-1894, Allemand) qui découvrit en 1887 que la lumière peut arracher un électron à du métal et de **Philipp Lenard** (1862-1947, Allemand) qui étudia en 1902 l'effet photoélectrique et détermina qu'il ne se déclenche qu'à partir d'une certaine fréquence de la lumière projetée. Ce dernier obtint le prix Nobel de physique en 1905. Devenu fervent Nazi et opposé à Einstein par rivalité scientifique puis par antisémitisme virulent, il est passé dans les oubliettes de l'Histoire.

Bien entendu, Einstein est aussi à l'origine de la théorie de la relativité restreinte et générale qui couvre l'infiniment grand alors que la mécanique quantique touche l'infiniment petit. Aussi curieux que cela puisse paraître, Einstein n'a jamais obtenu le prix Nobel pour ses travaux sur la relativité malgré son impact considérable sur la physique et l'astronomie.

En 1925, Einstein prédit un comportement particulier de la matière, le condensat de Bose-Einstein qui se manifeste lorsque l'on refroidit des gaz à très basse température. Les atomes se trouvent alors dans un état quantique d'énergie minimale présentant des propriétés physiques particulières. C'est le cas de l'Hélium superfluide, découvert en 1938, et qui, à très basse température, n'a plus de viscosité, à savoir qu'il peut se déplacer sans dissiper d'énergie. Bose est le nom du chercheur indien **Satyendranath Bose** (1894-1974) avec qui Einstein avait travaillé pendant les années 1920 et à qui l'ont doit les "bosons", qui vérifient les caractéristiques des condensats de Bose-Einstein. Cela comprend les particules élémentaires sans masse telles que les photons mais aussi certains atomes comme le deutérium ou l'Helium 4 ainsi que certaines quasi-particules comme les paires d'électrons supraconducteurs que sont les paires de Cooper. Les condensats Bose-Einstein se retrouvent dans les qubits supraconducteurs des ordinateurs quantiques et sont l'un des fondements de la physique de la matière condensée, qui décrit le fonctionnement des matériaux à très basse température.

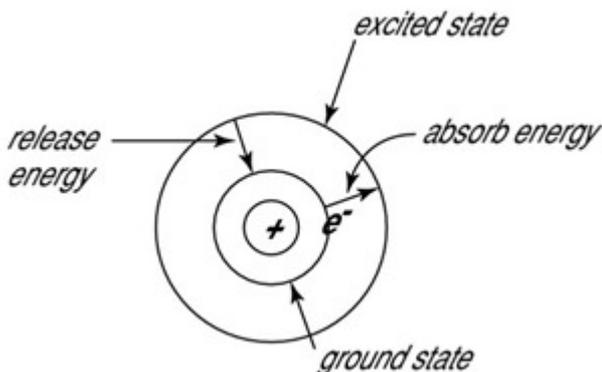
Einstein est aussi à l'origine de l'expérience de pensée dite du paradoxe EPR, ou Einstein Podolski Rosen, en 1935 portant sur la non localité des quantums et sur l'incomplétude de la mécanique quantique de l'époque. Cf **Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?**. Le débat portait sur le fait que la mécanique quantique ne semblait pas décrire complètement le monde physique, la fonction d'onde de Schrödinger étant insuffisante pour décrire la réalité physique des quantums. Einstein proposait l'introduction de variables cachées locales expliquant l'intrication quantique.



Il pensait qu'une réalité physique devait exister indépendamment des observations, que le hasard pur n'existait pas et que Dieu ne jouait pas aux dés. La réflexion a été poursuivie dans les années 1960 par l'Américain John Stewart Bell avec ses "inégalités". L'expérience d'Alain Aspect en 1982 a démontré qu'il n'y avait pas de variables cachées et donc, a pu, de ce fait invalider l'hypothèse des variables cachées d'Einstein. Chapeau bas !

Comble de l'Histoire, Einstein n'a pas réussi avant sa mort à parfaire sa théorie de la relativité générale qui était aussi incomplète que ne l'était pour lui la mécanique quantique. Il voulait notamment réconcilier la mécanique quantique et la gravité.

**Niels Bohr** (1885-1962, Danois) est un physicien, prix Nobel en 1922, à l'origine de la création en 1913 d'un modèle descriptif de l'atome d'hydrogène avec son noyau fait d'un proton et un électron tournant autour du noyau sur des orbites précises correspondant à un niveau d'énergie cinétique des électrons multiple de  $h/2\pi$ ,  $h$  étant la constante de Planck et  $n = 1, 2, 3, \text{etc.}$  Il s'appuie sur les travaux de l'Anglais **Ernest Rutherford** (1871-1937) qui découvrit en 1911 la structure des atomes avec leur noyau chargé positivement, grâce à ses protons, et leurs électrons tournant autour du noyau. Les électrons avaient été découverts par l'Anglais **Joseph John Thomson** (1856-1940) en 1897, ce qui lui valut d'obtenir le Prix Nobel de Physique en 1906. Ernest Rutherford avait imaginé l'existence des neutrons qui ne fut vérifiée expérimentalement qu'en 1932 par l'Anglais **James Chadwick** (1891-1974). **Marie Curie** (1867-1934) avait bien découvert le polonium et le radium en 1898 et certains effets de la radioactivité mais pas celle des neutrons.



Selon Bohr, les électrons émettent ou absorbent de la lumière lorsqu'ils changent d'orbite. Il est donc aussi l'un des fondateurs de la mécanique quantique, complétant les travaux de Planck et Einstein. Il a longtemps débattu sur le sujet, notamment avec Einstein à partir du Congrès de Solvay de 1927.

Avec Werner Heisenberg, Pascual Jordan et Max Born, Niels Bohr est à l'origine de l'interprétation dite de **Copenhague** de la physique quantique qui s'appuie sur trois principes clés :

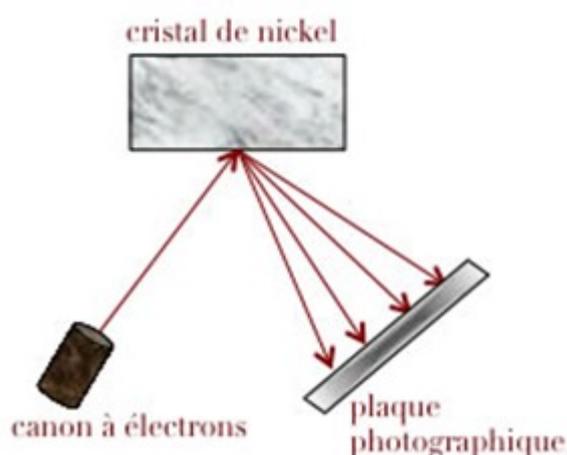
- La description d'une onde-particule est réalisée par sa fonction d'onde, et aucune autre information "cachée" ne peut servir à décrire son état.
- Lorsqu'une mesure de l'état d'un quantum est réalisée, sa fonction d'onde composite de plusieurs états est réduite à la fonction d'onde de l'un des états possibles du quantum. C'est l'effondrement de la fonction d'onde.
- Lorsque deux propriétés sont reliées par une relation d'incertitude, on ne peut pas mesurer les deux propriétés avec une précision supérieure à ce que permet la relation d'incertitude (principe d'Heisenberg). Qui plus est, lorsque l'on mesure la position d'une particule, on affecte son mouvement, et réciproquement.

A noter que le fils de Niels Bohr, Aage Niels Bohr, fut prix Nobel de physique en 1975 pour ses travaux portant sur la structure des noyaux des atomes ! Cf **Quantum Model of the Atom** de Helen Klus (2017).

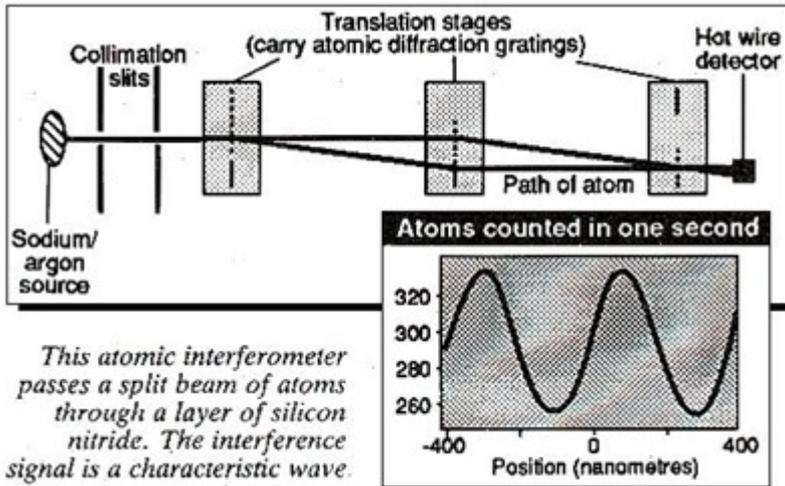
**Jacques Salomon Hadamard** (1865-1963, Français) est un mathématicien qui a donné son nom à la porte de Hadamard utilisée dans les ordinateurs et algorithmes quantiques. Il avait notamment travaillé sur les nombres complexes, la géométrie différentielle et les équations aux dérivées partielles, en particulier pendant les années 1920. On lui doit notamment les transformées qui portent son nom, des opérations matricielles carrées de 2 puissance  $n$  valeurs complexes ou entières de côté. Elles s'apparentent à des transformées de Fourier discrètes. La porte de Hadamard utilisée en calcul quantique crée une superposition de 0 et de 1 avec une transformée de Hadamard  $H1$ . Nous la verrons plus tard dans cette série d'articles.



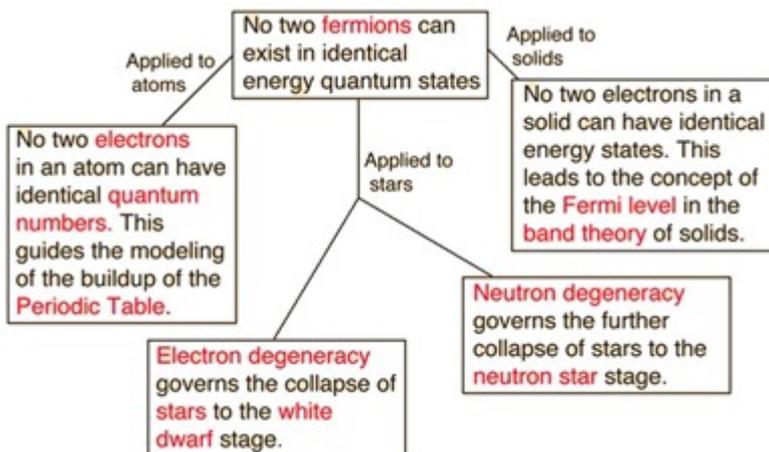
**Louis de Broglie** (1892-1987, Français) est un mathématicien et physicien à qui l'on doit, en 1924, le principe de dualité ondes particules applicable à toutes les particules élémentaires, dont les atomes. Cela lui permis d'obtenir le prix Nobel de physique en 1929. Cette dualité fut confirmée en 1927 pour ce qui concerne les électrons, par les équipes de l'Ecossois George Paget Thomson de l'Université d'Aberdeen et de **Clinton Davisson** (1881-1958) et **Lester Germer** (1896-1971) des Bell Labs aux USA (*ci-dessous*), qui ont partagé en 1937 un prix Nobel de physique pour ces expériences.



La confirmation de la dualité onde-particule n'a été vérifiée pour les neutrons que bien plus tard, en 1988, par Roland Gähler et Anton Zeilinger (*source*) et pour des atomes en 1991 par Olivier Carnal et Jürgen Mlynek (*source* du schéma *ci-dessous*) !



**Wolfgang Pauli** (1900-1958, Autrichien) est à l'origine du principe d'exclusion qui porte son nom élaboré en 1925 et selon lequel deux électrons ne peuvent pas avoir le même état quantique dans un atome, de la découverte du spin de noyau et d'électron et enfin, de la découverte du neutrino. Il obtient le prix Nobel de physique en 1945. Le spin d'électron est décrit comme un sens de polarisation magnétique ou comme une rotation angulaire de l'électron dans un sens ou l'autre, mais ce n'est qu'une image et pas une représentation physique. M'enfin !



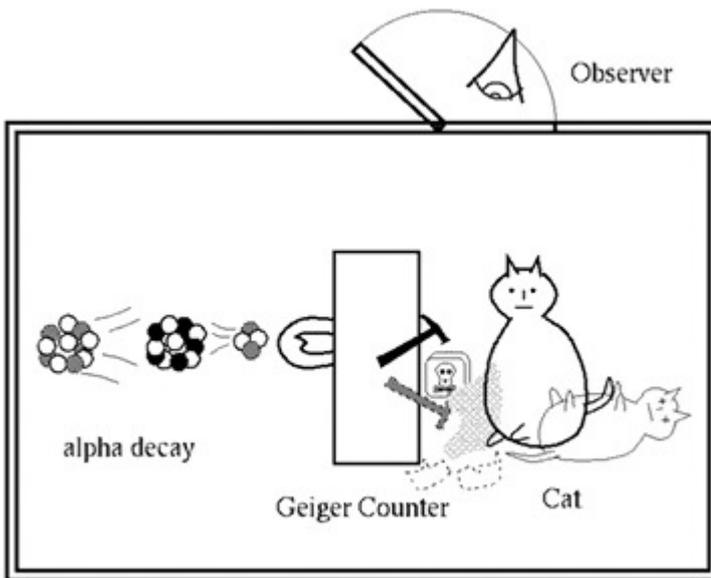
**Erwin Schrödinger** (1887-1961, Allemand) est un physicien, prix Nobel en 1933 pour sa fonction d'ondes, élaborée en 1926, ou équation de Schrödinger (*ci-dessous*), qui décrit l'évolution dans le temps et l'espace de l'état ondulatoire d'un quantum, à savoir les probabilités de trouver le quantum à un endroit donné et moment donné dans le temps. Je vous passe les détails sur l'explication de cette équation différentielle !

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(q,t) = H\Psi(q,t)$$

On lui doit aussi sa fameuse expérience de pensée quelque peu alambiquée visant à expliquer la notion d'états superposés avec son chat à la fois vivant et mort dans une boîte où l'on a placé une fiole de poison dont l'ouverture est provoquée par la désintégration d'un atome radioactif de radium via un compteur Geiger détectant cette radiation ionisantes. Comme le radium a une chance sur deux de se désintégrer après sa demi-vie, le chat a une chance sur deux d'être vivant et mort, tant que l'on n'ouvre pas la boîte. Quand on l'ouvre, il est vivant ou mort. Tant que la porte n'est pas ouverte, il est à la fois vivant et mort.

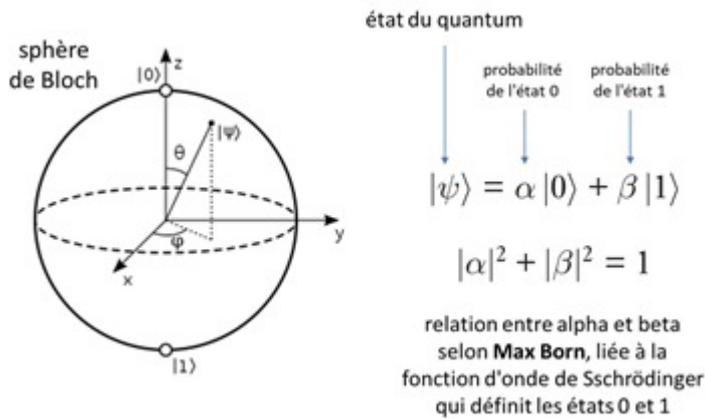
Bon bon. Sauf que le chat peut mourir juste après l'ouverture de la boîte si l'atome de radium se désintègre à ce moment là ! Et une fois que le chat est mort, il ne peut plus être vivant. Je me demande si Schrödinger n'a pas mélangé simultanément et causalité dans son expérience de pensée qui paraît bien trop compliquée ! De plus, la notion de demi-vie d'un atome radio-actif ne relève pas de la superposition des quantas. Un atome radioactif est soit en un état désintégré, avec une certaine probabilité que cela intervienne liée à sa demi-vie, soit en état normal. La désintégration n'est pas un processus réversible ! Il n'y a donc pas de superposition quantique des états de l'atome de radium entre état d'origine et état désintégré ! Un atome de radium donné n'est jamais à la fois en état normal et en état désintégré. Si c'était le cas, le chat serait d'ailleurs presque immédiatement mort !

Tout ça pour remettre en question l'interprétation de Copenhague de Niels Bohr et de ses compères ! En fait, il voulait mettre en évidence le fait que la superposition ne s'appliquait qu'à l'infiniment petit et pas aux objets macroscopiques. L'Histoire n'a retenu que le principe de superposition et pas cette différence entre le microscopique et le macroscopique.



Mais je ne vais pas me permettre de remettre en question un tel génie ! Oublions tout de même le chat et retenons la fonction d'onde de Schrödinger et la notion de superposition des états qui n'a de sens qu'à l'échelle microscopique ! Dans sa vie privée, Schrödinger était un grand coureur de jupons. Il était même capable de mener plusieurs liaisons en même temps, appliquant à sa vie privée le principe de la superposition quantique.

**Max Born** (1892-1970, Allemand) est un physicien et mathématicien à l'origine de la représentation mathématique des quantums sous forme matricielle. C'est à lui que l'on doit en 1926 l'explication statistique de la probabilité de trouver un électron dans un état énergétique donné à partir de sa fonction d'onde, élaborée par Schrödinger la même année. On retrouve ce principe dans la sphère de Bloch, où la somme du carré des fonctions d'onde des niveaux des différents états d'un quantum est égale à 1. Sachant que alpha et beta sont en fait des nombres complexes, pas des nombres entiers ou flottants. Werner Heisenberg était son assistant ! Max Born a obtenu le prix Nobel de physique en 1954.



**Werner Heisenberg** (1901-1976, Allemand) est un physicien, prix Nobel en 1932 à qui l'on doit en 1927 le fameux principe d'incertitude, ou plutôt d'indétermination, selon lequel on ne peut pas mesurer avec précision à la fois la position et la vitesse d'une particule élémentaire. Cette incertitude a été ensuite formulée mathématiquement en 1928 par Earle Hesse Kennard dans l'équation *ci-dessous*, où le produit de l'écart type de la position et la vitesse est supérieur à la moitié de la constante de Planck.

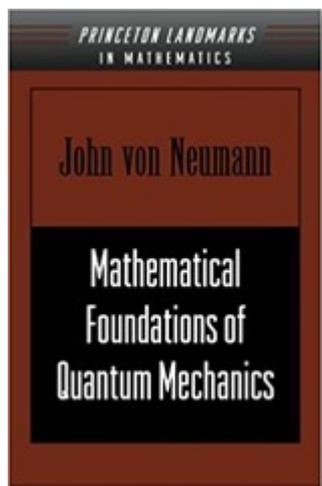
$$\Delta\chi\Delta\rho \geq \frac{\hbar}{2}$$

Pour certains, ce principe d'incertitude serait une interprétation simplificatrice appliquée à une compréhension corpusculaire de la matière. Il mène à se poser la question de la position et de la vitesse d'un électron, alors qu'il n'aurait pas de position précise. Il n'y a pas là d'incertitude qui traduirait une méconnaissance de notre part. Nous tentons d'appliquer à l'électron des concepts de mécanique classique qui ne lui sont pas applicables. Ou tout du moins, qui ne sont pas observables de près. En pratique, les particules quantiques ne sont pas des particules physiques classiques et on ne peut donc pas en mesurer aussi bien la vitesse que la position. On ne peut les décrire que par leur fonction d'onde (de Schrödinger).

Plus généralement, Heisenberg énonce le principe selon lequel dans l'infiniment petit, la mesure influe sur la grandeur à mesurer, ce que l'on retrouve dans les qubits dont la valeur est modifiée après chaque lecture, en se rabattant sur 0 ou 1, par le phénomène de décohérence.

On lui doit aussi la formulation matricielle et en algèbre linéaire de la mécanique quantique. Elle conduit à représenter l'état d'un système quantique sous forme de vecteurs qui permettent au passage de représenter mathématiquement la superposition des états quantiques.

**John Von Neumann** (1903-1957, Hongrois puis Américain) était un polymath, surtout mathématicien, qui a participé à la création des fondements mathématiques de la mécanique quantique, notamment dans "Mathematical Foundations of Quantum Mechanics" publié en 1932. Il a aussi participé au projet Manhattan aux USA. On lui doit aussi les concepts de base des ordinateurs.



**Boris Podolsky** (1896-1966, Russe puis Américain) est connu pour avoir conçu le paradoxe EPR avec Albert Einstein et Nathan Rosen en 1935 sur l'intrication quantique et les questions de non localité des propriétés des quantum intriqués. Il est ensuite devenu un spécialiste de l'électrodynamique qui porte sur l'analyse des champs électriques et électromagnétiques. Emigré aux USA, et selon les archives russes, il aurait été un espion du KGB après-guerre et aurait renseigné l'URSS sur les programmes atomiques américains.

**Nathan Rosen** (1909-1995, Américain puis Israélien) est le troisième larron du paradoxe EPR qui faisait partie de l'interprétation ou école de Copenhague, expliquant la logique probabiliste de la mécanique quantique par les interactions entre quanta et outils de mesure. Selon cette interprétation, il n'est pas nécessaire de trouver des variables cachées pour expliquer le fonctionnement de quanta intriqués. Emigrant en Israël en 1953, il y fonde l'institut de physique de l'Université Technion à Haïfa. Il a aussi travaillé sur les trous noirs.

**Paul Dirac** (1902-1984, Anglais) est un mathématicien et physicien. On lui doit l'équation sur le spin des électrons. Il prévoit l'existence de l'antimatière avec celle des positrons, les homologues des électrons avec une charge positive au lieu d'être négative. Il introduit aussi en 1939 la notation bra-ket dit de Dirac, qui définit les états de quantum, en  $\langle \text{philpsy} \rangle$  en algèbre linéaire. Il obtient le Prix Nobel de Physique en 1933, donc à 31 ans. Les prix Nobel des débuts du 20ème siècle pouvaient être attribués à de jeunes scientifiques, ce qui semble passé de mode depuis ! Le plus jeune prix Nobel de Physique fut Lawrence Bragg, qui l'obtint à 25 ans en 1915 pour sa découverte de la réfraction des rayons X réalisée à l'âge de 22 ans.

The Dirac equation in the form originally proposed by Dirac is:

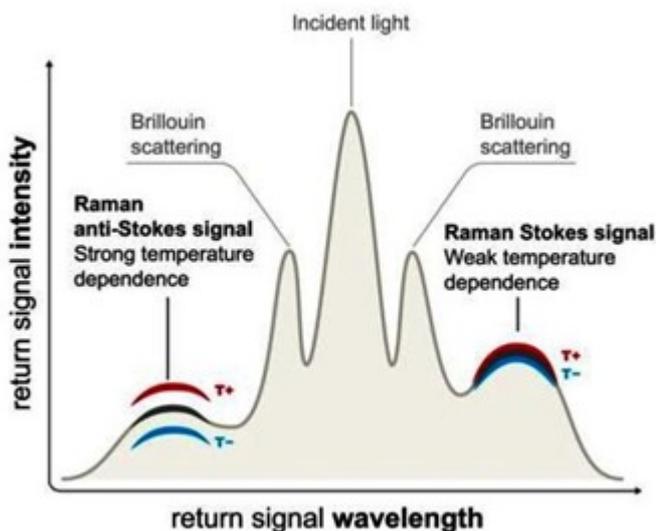
$$\left( \beta mc^2 + \sum_{k=1}^3 \alpha_k p_k c \right) \psi(\mathbf{x}, t) = i\hbar \frac{\partial \psi(\mathbf{x}, t)}{\partial t}$$

**Ettore Majorana** (1906-circa 1938, Italien) a imaginé l'existence d'un fermion en 1937 en s'appuyant sur les équations de Dirac, une particule qui serait sa propre antiparticule. Son existence aurait été découverte en 2012 et vérifiée en 2016, même si c'est contesté par les physiciens. Ces fermions de Majorana doivent permettre de concevoir des ordinateurs quantiques universels dits topologiques, la voie choisie par Microsoft après les travaux de Freedman et Kitaev à la fin des années 1990. Voir à ce sujet cette **intéressante conférence d'Etienne Klein** en 2016 sur l'œuvre d'Ettore Majorana. Ce dernier se serait suicidé après une dépression, et d'après Etienne Klein, ayant eu du mal à supporter la pression de son génie ! Mais sa disparition reste énigmatique car on n'a jamais retrouvé trace de son corps !

**Alonzo Church** (1903-1995, Américain) est un mathématicien à qui l'on doit le théorème de Church-Turing selon lequel n'importe quel calcul automatique peut-être réalisé avec une machine de Turing. La thèse de Church-Turing étendue édicte que le temps de calcul d'un problème est équivalent au pire à un polynôme fonction de la taille du problème. Il est à l'origine de la création du lambda calculus en 1936, qui sert de fondements mathématiques à la création du modèle de la machine de Turing.

Et les inconnus ou moins célèbres du congrès de Solvay de 1927 ? Nombre d'entre eux n'étaient pas des contributeurs de la mécanique quantique. Il y avait par exemple Émile Henriot et Marie Curie qui étaient focalisés sur la radioactivité, Paul Langevin (avec qui Marie Curie avait eu une liaison en 1910, après la mort accidentelle de Pierre Curie en 1906, son mari), ainsi qu'un bon nombre de chimistes. Deux noms méritent cependant d'être cités qui avaient un lien avec la physique quantique :

**Léon Brillouin** (1889-1969, Franco-Américain) qui est moins connu en France du fait de son expatriation aux USA pendant la seconde guerre mondiale. Il a contribué aux avancées de la mécanique quantique entre les deux guerres mondiales. Il a notamment rapproché la mécanique quantique de la cristallographie. Il a surtout découvert les phénomènes de diffraction des ondes traversant les cristaux ("Brillouin scattering").



Et puis **Hendrik Anthony Kramers** (1894-1952, Hollandais) qui a assisté Niels Bohr dans la création de la théorie des quanta et de la mécanique quantique.

### L'après-guerre

La mécanique quantique a connu un calme relatif entre les années 1935 et 1960. Les physiciens étaient alors surtout occupés par l'arme et l'énergie nucléaires. Cela a conduit à délaisser quelque peu la mécanique quantique, ou tout du moins à l'utiliser surtout dans le cas de la physique nucléaire, même si son apport était tout relatif dans ce cas.

**John Stewart Bell** (1928-1990, Irlandais) a relancé la recherche en mécanique quantique dans les années 1960 sur la notion d'intrication. On lui doit les "inégalités de Bell" qui mettent en avant les paradoxes soulevés par l'intrication quantique. Le théorème de Bell de 1964 indique qu'aucune théorie de variable cachée – imaginée par Einstein en 1935 – ne peut reproduire les phénomènes de la mécanique quantique. Il invalide donc l'hypothèse d'existence de variables cachées expliquant l'intrication quantique. Les inégalités de Bell ont été violées par les expériences du Français Alain Aspect en 1982 puis 1998, démontrant l'inexistence de ces

variables cachées.

**Alain Aspect** (1947, Français) invalide donc le paradoxe EPR et les inégalités de Bell en 1982 dans une expérience menée au laboratoire de SupOptique du bâtiment 503 de la faculté d'Orsay, puis confirmée dans d'autres expériences en 1998. Elle valide l'intrication de photons distants ayant interagi par le passé et le principe de la non localité des propriétés quantiques. Il explique cela très bien dans diverses conférences **dont celle-ci**. J'ai pu le rencontrer en mai 2018 avec Fanny Bouton à l'école Supoptique de Palaiseau près de Paris. Il continue de diffuser la bonne parole sur ses expériences, notamment dans des MOOC réalisés pour l'école Polytechnique où il continue d'enseigner. Il fait partie du conseil scientifique d'Atos.



**Philippe Grangier** (1957, Français) est un ancien collègue d'Alain Aspect qui avait travaillé sur l'expérience de ce dernier en 1982 avec Gérard Roger et Jean Dalibard. C'est l'un des spécialistes mondiaux de la cryptographie quantique.

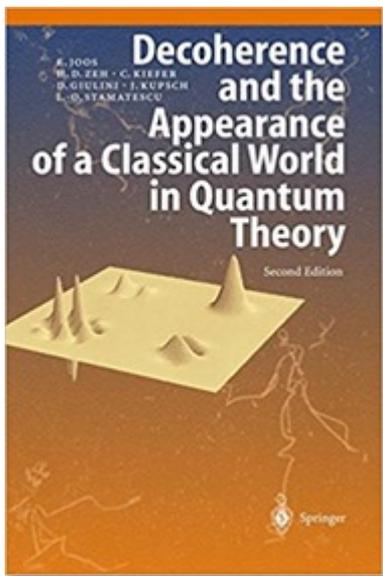
**Felix Bloch** (1905-1983, Suisse puis Américain) est un physicien à qui l'on doit notamment la représentation physique de l'état d'un qubit dans une sphère qui porte son nom, la sphère de Bloch, élaborée en 1946. Il fut prix Nobel de physique en 1952 pour ses travaux sur la résonance magnétique nucléaire. Il fut aussi le premier directeur du CERN en 1954.

**Hugh Everett** (1930-1982, Américain) est un physicien à qui l'on doit la formulation des états relatifs et d'une fonction d'onde globale intégrant les observations, les observateurs et les outils d'observation des phénomènes quantiques, et à l'hypothèse des multivers expliquant l'intrication quantique et la non localité.

**John Wheeler** (1911-2008, Américain) supervisa la thèse de Hugh Everett et un spécialiste de la gravitation quantique.

**Bruce DeWitt** (1922-2004, Américain) était un contributeur du rapprochement de la théorie de la relativité et de la mécanique quantique, notamment autour de la gravitation quantique. Il a aussi un lien avec les travaux de Hugh Everett sur les multiverses.

**Dieter Zeh** (1932-2018, Allemand) est le découvreur du phénomène de la décohérence quantique en 1970, c'est-à-dire, la fin du phénomène de superposition d'états de quantum, lorsque les particules sont perturbées par leur environnement. La notion de décohérence est clé dans la conception d'ordinateurs quantiques. L'objectif recherché étant de retarder autant que possible ce phénomène qui résulte de l'interaction entre les quantum et leur environnement. Dieter Zeh est notamment l'auteur de **On the Interpretation of Measurement in Quantum Theory** en 1970 (8 pages).



**Wojciech Zurek** (1951, Polonais) qui est un physicien spécialiste de la décohérence quantique qui a contribué aux fondements de la physique quantique appliquée aux calculateurs quantiques. On lui doit le théorème du non clonage qui veut qu'il soit impossible de cloner un qubits à l'identique sans qu'ils soient ensuite intriqués.

**Pascual Jordan** (1902-1980, Allemand) est un physicien qui a collaboré avec avec Max Born et Werner Heisenberg et à contribué à poser les fondements mathématiques de la mécanique quantique, notamment au niveau du calcul matriciel. Comme Philipp Lenard, il a été quelque peu oublié, en particulier, du fait de son adhésion au Parti Nazi pendant les années 1930.

**Anton Zeilinger** (1945, Autrichien) est un physicien prolifique qui a notamment fait avancer le champ de la téléportation quantique dans les années 2000. En 1991, il valide la dualité onde-particule des neutrons. Il a été aussi le premier à réaliser la téléportation d'un qubit. C'est un spécialiste de l'intrication quantique, ayant prouvé qu'il était possible d'intriquer plus de deux quantum ou qubits. Il a créé des fondements théoriques et expérimentaux de la cryptographie quantique.

**Serge Haroche** (1944, Français), prix Nobel de physique en 2012, a créé des qubits avec des atomes couplés à des cavités supraconductrices contenant quelques photons. On compte **Jean-Michel Raymond** et **Michel Brune** parmi ses collaborateurs. Serge Haroche a été le premier à mesurer le phénomène de décohérence de quantum (perte de superposition) dans une expérience en 1996 menée à l'ENS avec des atomes de rubidium. Serge Haroche fait partie du conseil scientifique d'Atos où il fait partie des scientifiques les plus réservés sur le devenir de l'informatique quantique.

### Les physiciens de l'informatique quantique

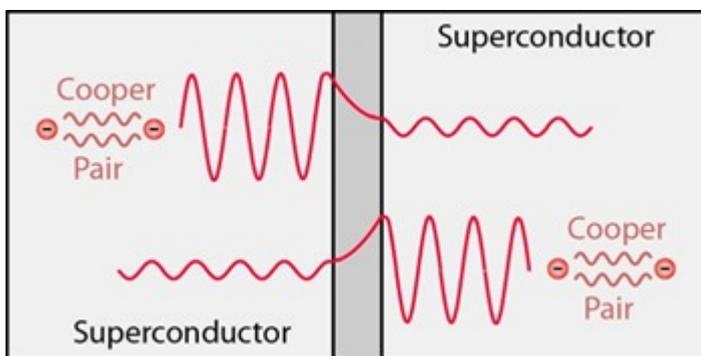
Je complète cette histoire par un tour d'horizon des physiciens de l'informatique quantique, qui sont souvent des spécialistes de l'optique ou de la matière condensée, comme les supraconducteurs, servant à créer des qubits.



**Richard Feynman** (1918-1988, Américain) théorise la possibilité de créer des ordinateurs quantiques dans **Simulating Physics with Computers** publié en 1981, capables de simuler des phénomènes quantiques pour résoudre des problèmes de simulation du fonctionnement de la matière. Il est aussi à l'origine de la découverte de l'hélium superfluide, sans trop de rapport avec l'informatique quantique. Enfin, il est surtout connu du grand public scientifique pour son grand talent de vulgarisateur.



**Brian Josephson** (1940, Anglais) est un physicien de l'Université de Cambridge, prix Nobel de physique en 1973 à 33 ans, ce qui est très rare, pour sa prédiction de l'effet qui porte son nom en 1962 alors qu'il n'avait donc que 22 ans. L'effet Josephson décrit le passage de courant par effet tunnel dans un supraconducteur au travers d'une fine barrière isolante de quelques nanomètres d'épaisseur. En-dessous d'une certaine tension, le courant se met à osciller. Il est généré par les électrons organisés en paires de Cooper du nom de Leon Cooper qui les a découverts en 1952. Ces électrons en paires sont de spins opposés (polarité magnétique) et se constituent du fait du rapprochement des ions métalliques à leur passage. Le système se comporte comme une résistance associée à une inductance en boucle, l'oscillation étant contrôlable par un champ magnétique et pouvant se faire avec deux états énergétiques distincts. La supraconductivité a été découverte pour sa part en 1911 par le Hollandais Heike Kamerlingh Onnes.

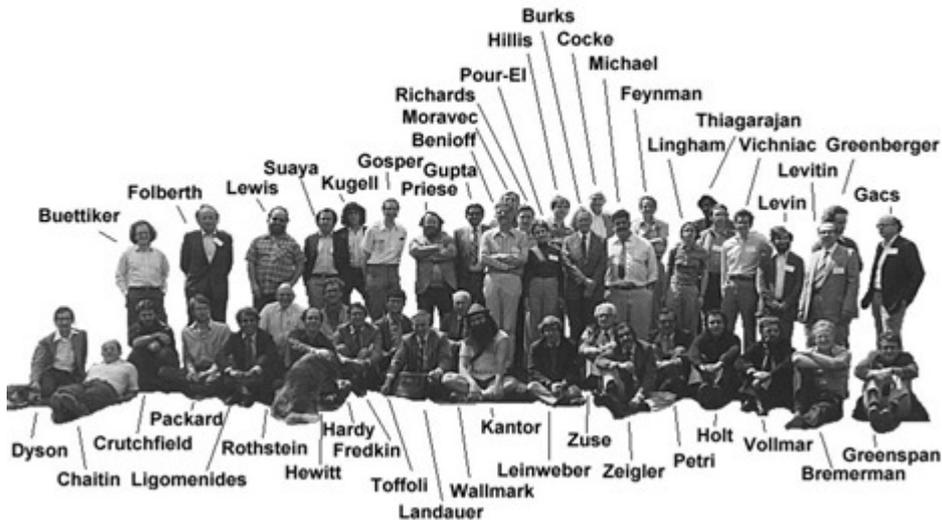


C'est la base des qubits supraconducteurs et de leurs portes quantiques ! Le physicien Serge Haroche explique l'effet Josephson dans cette **vidéo de son cours** du Collège de France de 2011. A noter que Brian Josephson s'intéresse depuis sa découverte à la méditation transcendante.

**Yuri Manin** (1937, Russe et Allemand) est un physicien qui avec Paul Benioff et Richard Feynmann fait partie

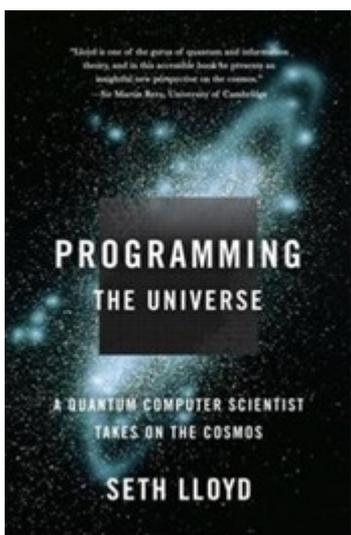
des premiers à avoir proposé l'idée de créer des ordinateurs quantiques, et en 1980 dans son livre "Computable and Uncomputable". Ils participaient à la conférence "Physics & Computation" du MIT en 1981 qui rassemblait un bon nombre de noms connus de l'informatique quantique comme Tommaso Toffoli et Edward Fredkin (*ci-dessous, source*).

## 1<sup>st</sup> conference on Physics and Computation, MIT, 1981



**Tommaso Toffoli** (1943, Italien puis Américain) est un ingénieur connu pour la création de la porte quantique à son nom, une porte conditionnelle à trois entrées.

**Edward Fredkin** (1934, Américain) est professeur de Carnegie Mellon à qui l'on doit la porte quantique qui porte son nom, une porte d'interversion à deux entrées (SWAP). Il est aussi le concepteur de la notion d'ordinateur réversible. C'est un inventeur prolifique, à l'origine des transpondeurs d'identification de véhicules et de la géonavigation automobile. C'est enfin un promoteur de la notion de "philosophie digitale" qui réduit le monde et son fonctionnement à un programme géant quantique, une théorie qu'il partage avec **Seth Lloyd** (1960, Américain) auteur de "Programming the Universe".



**Wolfgang Paul** (1913-1993, Allemagne), prix Nobel de physique en 1989 est un physicien qui conceptualise les qubits à base d'ions piégés dans les années 1950.

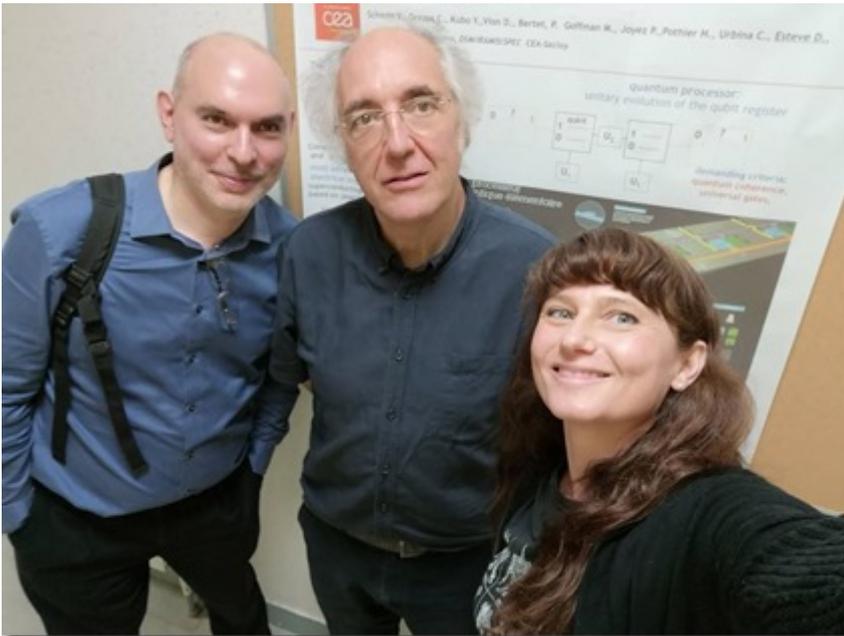
**Juan Cirac** (1965, Espagnol) et **Peter Zoller** (1952, Autriche) sont des physiciens. Ils théorisent, conçoivent et testent les premiers qubits à ions piégés en 1996 en s'appuyant sur les travaux de Wolfgang Paul.

**Rainer Blatt** (1952, Autrichien et Allemand) de l'Université d'Innsbruck est un spécialiste, entre autres choses, des qubits réalisés avec des ions piégés. Il est le premier à avoir pu intriquer l'état quantique de deux ions piégés.

**David Wineland** (1944, Américain) est un physicien du NIST connu pour ses avancées dans le domaine des ions piégés. Il a obtenu le Prix Nobel de physique en 2012 conjointement avec le Français Serge Haroche.

**Edward Fahri** (1952, Américain) est un physicien ayant travaillé dans de nombreux domaines, notamment dans la physique des particules à haute énergie, en particulier au LHC du CERN à Genève. Il est surtout le créateur d'algorithmes adaptés aux ordinateurs quantiques adiabatiques comme ceux de D-Wave qui permettent de faire converger un système complexe de qubits vers une solution de problèmes d'optimisation, une méthode que l'on appelle le recuit quantique ("quantum annealing").

**Daniel Estève** (1954, Français) est un physicien spécialiste de l'informatique quantique, responsable du laboratoire Quantronique du CEA à Saclay, lancé en 1984. Il planche en particulier sur les qubits supraconducteurs à effet tunnel exploitant une jonction Josephson de type transmon. Il a créé un premier qubit opérationnel en 1997, le quantronium, suivi d'un autre prototype en 2002. On peut considérer qu'il est l'un des grands pionniers de cette branche. Daniel Estève fait partie du conseil scientifique d'Atos. Je l'ai rencontré début juin avec Fanny Bouton et il nous a brossé un beau tableau de l'histoire des qubits supraconducteurs.



**Michel Devoret** (1953, Français) est un ingénieur télécom devenu physicien, cofondateur du laboratoire Quantronique avec Daniel Estève au CEA de Saclay entre 1985 et 1995, qui est un des pionniers mondiaux des qubits supraconducteurs à base d'effet Josephson. Il est depuis 2002 professeur à l'Université de Yale aux USA. Il a aussi travaillé avec John Martinis, alors à l'Université de Santa Barbara, pour faire un inventaire en 2004 des bases de la création de qubits supraconducteurs dans **Implementing Qubits with Superconducting Integrated Circuits** (41 pages).

**Maud Vinet** (1975, Française) dirige un laboratoire du CEA LETI de Grenoble qui planche sur les nanotechnologies CMOS à l'origine de nombreux progrès comme le SOI utilisé par SOITEC et le FD-SOI de STMicroelectronics, deux technologies qui réduisent la consommation électrique et améliorent la performance

des chipsets en CMOS, notamment dans la mobilité. Son laboratoire planche sur la création de qubits à base de composants CMOS. Je l'ai rencontrée à Grenoble avec Fanny Bouton le 19 juillet 2018.

**Artur Ekert** (1961, Polonais et Anglais) est un physicien en mécanique quantique connu pour être l'un des créateurs du champ de la cryptographie quantique. Petite anecdote : il avait rencontré Alain Aspect en 1992 pour lui parler de cette inspiration après avoir découvert les expériences de ce dernier. C'est un bel exemple d'inventions par étapes, un chercheur en inspirant un autre ! Il fait aussi partie du conseil scientifique d'Atos.

**David DiVicenzo** (1959, Américain) était un chercheur chez IBM et il est à l'origine des critères qui portent son nom et qui définissent les besoins minimum d'un ordinateur quantique. Il est maintenant chercheur et professeur à l'Université d'Aix la Chapelle en Allemagne.

**Nicolas Gisin** (1952, Suisse) est un physicien spécialiste de la communication quantique. Il a démontré la non localité quantique avec une expérience en 1997 sur une distance de 10 km, étendant la performance réalisée en laboratoire par Alain Aspect en 1982. Comme Philippe Grangier, c'est un spécialiste de la cryptographie quantique. Il est notamment le cofondateur de IDQ en 2001, une startup suisse spécialisée dans la génération de nombres véritablement aléatoires à partir de photons traversant un miroir dichroïque.

**Lieven Vandersypen** (Pays Bas) est un scientifique de l'Université TU Delft et de sa spin-off QuTech qui travaille notamment avec Intel dans les ordinateurs quantiques supraconducteurs.

**John Preskill** (1953, Américain) est professeur à Caltech, c'est l'inventeur de l'appellation de suprématie quantique en 2011 et du NISQ en 2018, les Noisy Intermediate-Scale Quantum, la dénomination des calculateurs quantiques actuels et à venir dans un futur proche, qui sont de taille intermédiaire et sujets à un bruit quantique qui en limite les capacités. C'est aussi un très bon vulgarisateur. Cf sa présentation de décembre 2017 qui fait un tour d'horizon de l'état de l'art de l'informatique quantique **Quantum Computing for Business** (41 slides).

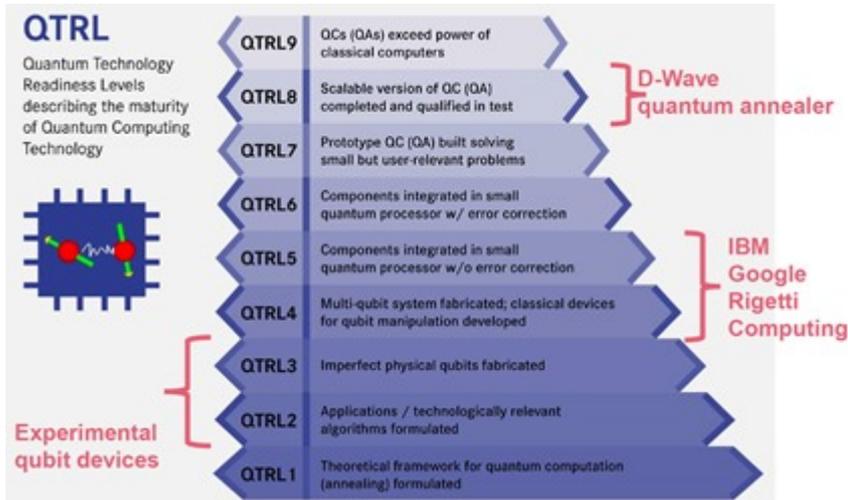
**John Martinis** (1958, Américain), est un physicien de l'UCSB et Google. Il dirige les efforts dans l'informatique quantique de ce dernier. Il a fait sa thèse dans le laboratoire Quantronics de Daniel Estève au CEA à Saclay.

**Elisabeth Giacobino** (circa 1945, Française) est une physicienne, chercheuse dans le Laboratoire Kastler Brossel, à l'ENS et au CNRS. Elle est spécialisée en optique.

**Jason Alicea** (Américain) est un professeur de physique théorique de l'IQIM, **Institute for Quantum Information and Matter**, de l'Université Caltech en Californie. C'est un spécialiste de l'informatique quantique topologique, un concept utilisé par Microsoft et Nokia, ce dernier via les Bell Labs aux USA. Cf ses **publications dans Arxiv**.

**Jürgen Mlynek** (1951, Allemand) est un physicien spécialiste de l'optique et de l'interférométrie. Il est le coordinateur de l'European Flagship project sur le quantique. On lui doit comme, évoqué au sujet de Louis De Broglie, l'expérience validant la dualité ondes-particules des atomes réalisée en 1991.

**Kristel Michielsen** (cica-1969, Belge) est une physicienne œuvrant à l'université d'Aix la Chapelle en Allemagne. Elle a contribué à de nombreux travaux en informatique quantique aussi bien côté physique que côté algorithmes. Elle est à l'origine de la création de l'échelle **QTRL**, pour Quantum Technology Readiness Level, qui définit le niveau de maturité des technologies d'ordinateurs quantiques sur 9 niveaux (*ci-dessous*).



**Jean-Michel Gérard** (1962, Français) est un physicien du laboratoire Inac du CEA à Grenoble et directeur adjoint du laboratoire PHELIQS (PHotonique, ELectronique et Ingénierie QuantiqueS) qui associe l'Université de Grenoble et le CEA (c'est une UMR : Unité Mixte de Recherche). Il travaille notamment sur la création de sources de photons uniques.

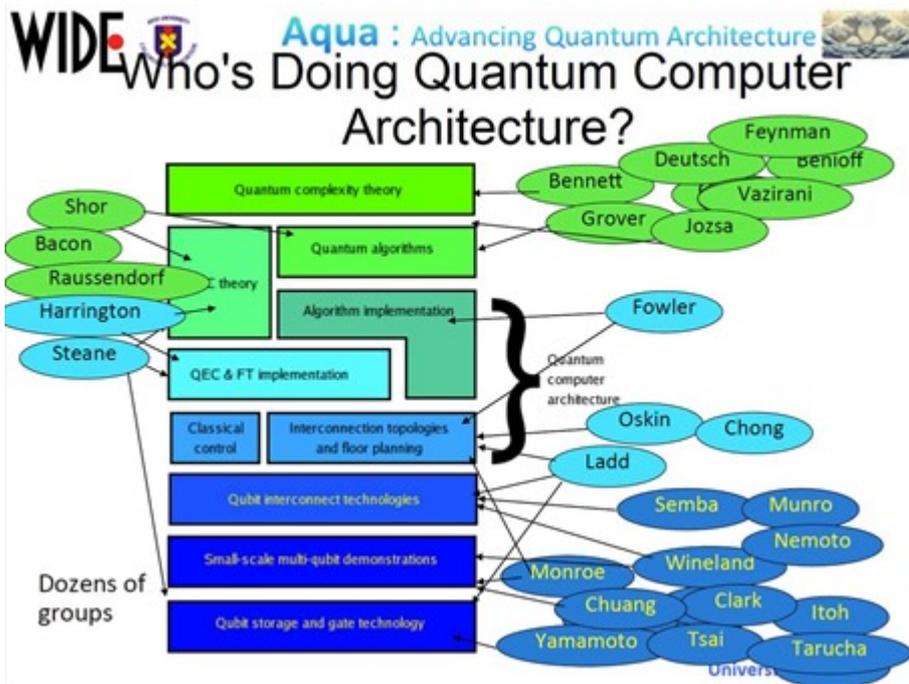
**Pascale Sénellart** (Française) est une physicienne du CNRS, au laboratoire C2N à Marcoussis qui travaille également sur les sources de photons. Elle est aussi cofondatrice de la startup Quandela, spécialisée... dans les sources de photons !

### Les scientifiques des algorithmes quantiques

Terminons ce long "hall of fame" avec quelques-uns des principaux contributeurs à la création d'algorithmes quantiques, une discipline relativement nouvelle qui a vu le jour au début des années 1990 et que nous couvrirons dans une partie dédiée de cette série d'articles.



Autre manière de voir les choses, extraite de la présentation **Quantum Computer Architecture** Rod Van Meter, 2011 (89 slides). Histoire de n'oublier personne ! Avec en vert, les spécialistes des algorithmes quantiques, en bleu clair, ceux des codes de correction d'erreurs, et en bleu foncé, ceux des couches physiques des qubits.



**Paul Benioff** (1930, Américain) est un physicien pionnier de l'informatique quantique théorique. A noter qu'il est passé quelques temps par le CNRS en France entre 1979 et 1982, à l'Université de Marseille-Luminy.

**Umesh Virkumar Vazirani** (1945, Indien) est enseignant à Berkeley. C'est l'un des fondateurs du calcul quantique, avec son papier coécrit en 1993 avec son étudiant Ethan Bernstein, "Quantum Complexity Theory", pas facile à piger pour le profane. Il est aussi le créateur de l'algorithme de la transformée de Fourier quantique utilisé par Peter Shor pour son fameux algorithme de factorisation de nombres entiers.

**Peter Shor** (1959, Américain) est le père de l'algorithme du même nom qui permet la factorisation d'entiers en nombres premiers, à base de transformées de Fourier quantiques. Il est aussi à l'origine d'un algorithme de correction d'erreurs à 9 qubits pour les ordinateurs quantiques. On lui doit indirectement tout le mouvement de la cryptographie post-quantique qui vise à créer des systèmes de cryptographie résistant au cassage de clés publiques via son algorithme... avec des calculateurs quantiques qui n'existent pas encore. Peter Shor a créé son fameux algorithme de factorisation alors qu'il travaillait aux Bell Labs. Il enseigne les mathématiques appliquées au MIT depuis 2003.

**David Deutsch** (1953, Israélien et Anglais) est un physicien du laboratoire d'informatique quantique de l'Université d'Oxford au Royaume-Uni. Il est l'auteur d'un algorithme de recherche qui porte son nom, avec deux variantes, une première en 1985 et une seconde en 1992 co-créée avec Rochard Jozsa. L'algorithme est très performant mais n'a pas de véritable utilisation pratique.

**Michael Freedman** (1951, Américain) est un mathématicien Médaille Fields en 1986 qui dirige le laboratoire Microsoft Station Q à Santa Barbara en Californie. Il est l'un des pères de l'informatique quantique topologique avec Alexei Kitaev.

**Alexei Kitaev** (1963, Russe et Américain) est avec Michael Freedman l'un des pères du concept d'ordinateur quantique topologique en 1997, utilisé par Microsoft. Il était chercheur chez Microsoft Research au début des années 2000 et est maintenant à l'Université de Caltech.

**Aram Harrow** (Américain) est un spécialiste prolifique des algorithmes quantiques. Il enseigne au MIT. Il est l'auteur d'un algorithme de résolution d'équations linéaires avec Avinatan Hassidim et Seth Lloyd. Cf

**Quantum algorithm for linear systems of equations**, 2009 (24 pages).

**Daniel Gottesman** (1970, Américain) est un physicien connu pour ses travaux sur les codes de correction d'erreurs quantiques (QEC). Il travaille au Perimeter Institute de Waterloo au Canada. C'est le coauteur du théorème de Gottesman–Knill qui prouve que l'intrication quantique n'est pas suffisante pour générer une meilleure performance des algorithmes quantiques exécutés sur ordinateurs quantiques par rapport à des algorithmes optimisés pour ordinateurs traditionnels. Heureusement, il y a aussi la superposition des états des qubits ! Daniel Gottesman a fait sa thèse à Caltech sous la supervision de John Preskill.

**Gil Kalai** (1955, Israélien) est un professeur de mathématique de l'Université Hébraïque de Jérusalem et à Yale. Il est l'inventeur de nombreux algorithmes. Son ambition est de démontrer mathématiquement qu'il sera impossible aux ordinateurs quantiques universels de monter en puissance à cause de leur taux d'erreurs.

**Scott Aaronson** (1981, Américain) enseigne les sciences de l'information à l'Université d'Austin au Texas. C'est un grand spécialiste des algorithmes quantiques et des théories de la complexité. Il est notamment à l'origine d'un algorithme quantique d'échantillonnage de bosons ("boson sampling"). Les bosons sont les particules immatérielles comme les photons alors que les particules matérielles comme les électrons, les neutrons et les protons sont des fermions.

**Andrew Steane** (1965, Anglais) est à l'origine de codes de correction d'erreurs quantiques qui portent son nom et qu'il a conçus en 1996.

**Alan Aspuru-Guzik** (circa-1978, Américain) est un directeur de recherche de l'Université de Toronto, anciennement à Harvard, qui a notamment créé divers algorithmes de chimie quantique, un sujet que j'aborderais dans la partie consacrée aux algorithmes quantiques.

**Philippe Duluc** (1961, Français) est CTO en charge du big data et de la cybersécurité chez Atos. Il pilote les efforts du groupe Atos dans l'informatique quantique. C'est un ingénieur de l'Ecole Polytechnique passé par l'ENSTA. Il était initialement spécialisé dans la cybersécurité.

**Cyril Allouche** (Français), dirige les efforts de R&D en informatique quantique chez Atos depuis leurs débuts en 2015. Il est l'un des rares français dans les équipes européennes du Flagship Quantique de l'Union Européenne. Philippe Duluc et Cyril Allouche sont les "implémenteurs" de la vision de Thierry Breton, le CEO d'Atos, qui est l'un des rares industriels français du numérique à faire le pari de l'informatique quantique. Si ce n'est le seul !



**Dave Wecker** (Américain) est un architecte en informatique quantique chez Microsoft. Il travaille notamment sur la conception d'algorithmes quantiques. On lui doit notamment la notion de "magic states", une technique

de gestion de codes de corrections d'erreurs s'appuyant sur des états spécifiques descriptibles par leur position dans la sphère de Bloch (que nous verrons dans la partie sur les qubits), décrits dans **Universal quantum computation with ideal Clifford gates and noisy ancillas**, 2005 (14 pages) de Sergey Bravyi et Alexei Kitaev.

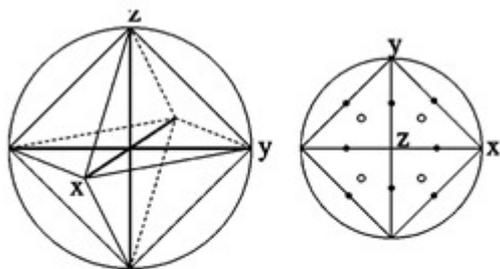


FIG. 1. Left: the Bloch sphere and the octahedron  $O$ . Right: the octahedron  $O$  projected on the  $x$ - $y$  plane. The magic states correspond to the intersections of the symmetry axes of  $O$  with the Bloch sphere. The empty and filled circles represent  $T$ -type and  $H$ -type magic states, respectively.

**John Watrous** (Canadien) est un chercheur de l'Université de Waterloo au Canada spécialisé dans les algorithmes quantiques et les théories de la complexité. Il a déjà collaboré avec Scott Aaronson. Il est l'auteur du volumineux **The Theory of Quantum Information**, 2018 (598 pages).

**Ryan Babbush** (circa-1989, Américain) est un chercheur de Google spécialisé dans la création d'algorithmes de simulation de phénomènes physiques quantiques impossibles à simuler sur supercalculateurs. Il vise à créer des solutions commerciales de chimie quantique.

**Matthias Troyer** (1968, Autrichien) est professeur de physique computationnelle à l'ETH Zurich. Il a rejoint Microsoft Research à Redmond début 2017. Il est l'un des créateurs du langage Q# de programmation d'ordinateur quantique topologique. Il s'intéresse notamment à la simulation chimique avec des ordinateurs quantiques.

Bref, ça en fait du monde ! Nous croiserons une bonne part de ces personnages lors des épisodes suivants de cette série au gré des thèmes abordés. Et des contributeurs plus jeunes, parfois de moins de 40 ans, vont s'ajouter à cette liste pour faire avancer la discipline de l'informatique quantique qui ne fait que commencer à poindre du nez !

---

Dans la **partie suivante**, nous irons faire un tour des **grands fondements de la mécanique quantique** que nous avons évoqués ci-dessus, et notamment ceux qui sont utiles pour comprendre le fonctionnement des qubits et des ordinateurs quantiques. Cela sera assez rapide.

Cet article a été publié le 24 juin 2018 et édité en PDF le 15 mars 2024.  
(cc) Olivier Ezratty – “Opinions Libres” – <https://www.oezratty.net>