



Extraits du livre

Informatique quantique De la physique quantique à la programmation quantique en Q#

[Benoît PRIEUR](#)

-
- **Glossaire de la physique quantique**

A

Accélérateur de particules : un accélérateur de particules est un dispositif expérimental de très grande taille (parfois plusieurs kilomètres) qui permet d'accélérer des particules à très grande vitesse se rapprochant ainsi de la vitesse de la lumière. Ce dispositif permet de procéder à des expériences qui permettent entre autres de vérifier des résultats théoriques, y compris en physique quantique.

Algorithme de Glover : algorithme quantique dont le champ d'application inclut certains problèmes NP, la coloration de graphes notamment, pour lesquels sa complexité serait a priori meilleure que ce que peut proposer l'informatique classique.

Algorithme de Shor : algorithme quantique dont l'objectif est la factorisation d'un entier naturel et dont la complexité en temps est significativement meilleure que celle du meilleur algorithme en informatique dite classique.

Année-lumière : unité surtout utilisée en astronomie correspondant à la distance parcourue par la lumière dans le vide en une année.

Antilepton : antiparticule correspondant au lepton dans l'antimatière.

Antimatière : l'antimatière peut être vue comme un double symétrique à la matière. Elle est composée d'antiparticules comme les positrons ou les antineutrons. Elle a pour propriété de « s'annihiler » quand elle rencontre de la matière. L'antimatière n'existe pas de façon naturelle sur Terre, mais il y en a dans l'univers.

Antiparticule : ce sont les particules qui composent l'antimatière. Par exemple, les positrons (les « antiélectrons ») ou les antineutrons sont des antiparticules.

Antiquark : antiparticule qui correspond au quark dans l'antimatière. Il est impliqué dans le **méson**.

Atome : un atome est la plus petite entité d'un corps qui peut se combiner chimiquement avec une autre particule. On le définit comme étant composé d'un noyau lui-même composé de nucléons (c'est-à-dire de neutrons et de protons) et d'un nuage d'électrons autour de ce noyau. Un atome est électriquement neutre.

B

Baryon : un baryon est une catégorie de particules composites. Ainsi les protons et les neutrons sont des baryons. Ce qui caractérise un baryon est d'être formé de trois quarks.

Boson : particule dont le spin est en valeur entière. C'est ce qui distingue un boson d'un fermion qui lui a son spin en valeur demi-entière.

C

Chat de Schrödinger ou **paradoxe du chat de Schrödinger** : expérience de la pensée extrêmement connue qui met en évidence le phénomène de superposition (« chat mort » et « chat vivant ») et la question de la mesure quantique (ouverture de la boîte). Plus généralement, cette expérience cherche à mettre en évidence les failles éventuelles de l'**interprétation de Copenhague**.

Chimie quantique : branche de la chimie qui utilise la physique quantique pour comprendre les propriétés chimiques. Depuis la version 0.3 de son framework quantique, Microsoft fournit des outils d'informatique quantique en direction de cette discipline.

Constante de Planck : constante fondamentale de la physique quantique qui permet de déterminer les longueurs et les masses (entre autres) dans l'infiniment petit. Elle a été nommée en l'honneur du physicien Max Planck.

Cryptographie quantique : cryptographie qui utilise l'informatique quantique pour générer des clés de chiffrement utilisées par des algorithmes de cryptographie classiques.

Cryptographie post-quantique : cryptographie qui utilise l'informatique quantique pour inventer de nouvelles méthodes cryptographiques basées uniquement sur un fonctionnement quantique.

D

Décohérence quantique : théorie de la rupture des comportements quantiques et plus généralement de la transition entre physique classique et physique quantique. La mesure quantique illustrée par l'ouverture de la boîte de Schrödinger dans l'expérience de la pensée du même nom est un des nombreux aspects qui constituent une sorte de « frontière » entre physique classique et physique quantique. Cette frontière est tout le propos de la décohérence quantique.

Dualité onde-corpuscule : propriété physique relative au fait que tout système physique possède à la fois des propriétés ondulatoires (onde) et des propriétés corpusculaires (corps). On prend souvent l'exemple de la lumière qui possède à la fois une longueur d'onde et qui est également corpusculaire (elle est faite de photons).

E

Effet tunnel : l'effet tunnel est une propriété purement quantique qui permet à une particule de franchir une barrière de potentiel alors même que son énergie n'est pas suffisante pour justement franchir cette barrière. En physique classique, la particule est arrêtée et ne peut pas franchir ladite barrière. En physique quantique, si l'état quantique de la particule inclut une probabilité non nulle de présence de l'autre côté de la barrière alors le franchissement est possible offrant donc une sorte de « tunnel » à la particule.

Électron : particule subatomique chargée électriquement négativement. L'électron tourne autour du noyau atomique qui lui-même est composé de neutrons et de protons. L'atome étant électriquement neutre, il y a autant d'électrons que de protons. C'est par ailleurs un **fermion** de la famille des **leptons**.

Électron-volt : unité d'énergie utilisée pour l'infiniment petit. Elle est égale à la charge électrique accélérée par une tension électrique de un volt.

Élément chimique : ensemble des atomes qui possède un certain nombre de protons dans leurs noyaux (voir numéro atomique).

État quantique : l'état quantique représente tous les aspects d'un système quantique. C'est un état probabiliste et non déterministe, en tout cas jusqu'à ce que la mesure quantique intervienne.

Expérience d'Aspect : expériences conduites par l'équipe du physicien français Alain Aspect. Elles ont permis de produire et d'observer expérimentalement l'intrication quantique et plus généralement de vérifier expérimentalement la violation des inégalités de Bell.

Expériences de Serge Haroche : expériences conduites par l'équipe du physicien français Serge Haroche, à partir de 1996. Elles ont permis de produire et d'observer expérimentalement la superposition quantique.

Expériences de Stern et Gerlach : expérience conduite en 1922 mettant en évidence l'existence du spin et de sa nature quantique.

F

Fentes de Young : expérience fondamentale en physique qui consiste à provoquer une interférence entre deux faisceaux lumineux d'une même source. Pour cela, on les fait passer par des trous percés dans une plaque. Elle permet de comprendre le fonctionnement de la lumière en physique classique. Mais cette expérience a également une interprétation en physique quantique : d'une part, elle correspond à un état superposé lors du franchissement de la plaque. D'autre part, elle met en exergue le problème de la mesure quantique.

Fermion : les fermions constituent une catégorie des particules qui ont la caractéristique d'avoir un spin en valeur demi-entière (par exemple $1/2$, $3/2$, etc.). Citons par exemple l'électron ou encore le proton qui sont des fermions. L'autre grande catégorie relative à la valeur de spin, celle en valeur entière, est le **boson**.

Fluctuation quantique : terme qui se rencontre assez fréquemment et qui représente le comportement non prévisible et stochastique d'un système quantique. C'est le principe d'incertitude d'Heisenberg qui explique une fluctuation quantique.

Fonction d'onde : la fonction d'onde est la représentation de l'état quantique d'un système quantique ou d'une particule. Mathématiquement, elle correspond à une amplitude de probabilité. La probabilité est proportionnelle au carré de la fonction d'onde.

Force d'interaction électro-magnétique ou **force de Lorenz** : c'est la force subie par une particule au sein d'un champ électromagnétique. Elle est l'une des quatre grandes forces de la nature, les trois autres étant la gravitation, l'interaction faible et l'interaction forte.

Force d'interaction faible ou **force faible** ou **force nucléaire faible** : c'est une des quatre forces de la nature (voir la **théorie du tout**). Elle correspond à la désintégration radioactive qui permet la fusion nucléaire.

Force d'interaction forte ou **force de couleur** : c'est ce qui permet d'assurer la cohésion des quarks entre eux au sein d'une particule composite. Les entités détentrices de cette force de couleur sont les gluons. Le résultat de cette cohésion permet d'obtenir un hadron. Selon la structure (nombre de quarks notamment), on accède à une catégorie différente. Ainsi un baryon contient trois quarks, là où un méson est composé de paires quark-antiquark.

Force d'interaction gravitationnelle : ce n'est ni plus ni moins que la gravité qui est la première des quatre grandes forces (gravité, électromagnétisme, interaction forte, interaction faible) à avoir été découverte.

G

Gluon : c'est la particule qui détient l'**interaction forte (force de couleur)** et qui donc assure la cohésion des **quarks** entre eux. Les gluons sont catégorisés dans les **bosons** de jauge.

H

Hadron : un hadron est un composé de particules « unies » par l'interaction forte (force de couleur). Il est composé de **quarks**, d'**antiquarks** et de **gluons** (justement détenteurs de la force de couleur). On peut distinguer deux grandes familles parmi les hadrons : les **baryons** (les neutrons et les protons notamment) et les **mésons**.

I

Inégalités de Bell : les inégalités de Bell sont des relations établies par John Stewart Bell qui stipulent schématiquement que s'il y a effectivement des variables cachées alors ces inégalités sont respectées. Au contraire, l'hypothèse de Copenhague correspond à une violation systématique des inégalités de Bell, d'ailleurs vérifiée par l'expérience.

Informatique quantique : champ de l'informatique qui reprend les grands principes de la physique quantique pour construire un ordinateur quantique. Les grands principes retenus sont en particulier la superposition et l'intrication quantiques.

Interprétation de Copenhague : thèse de Niels Bohr interprétant l'état de l'art en mécanique quantique et notamment l'intrication quantique, comme étant explicable par une sorte de **hasard fondamental** et non par l'existence de supposées **variables cachées**, hypothèse préférée par Albert Einstein suite à la mise en évidence du **paradoxe EPR**. Par la suite, les différentes découvertes et expériences consolident plutôt cette interprétation.

Intrication quantique ou **enchevêtrement quantique** : phénomène quantique, particulièrement contre-intuitif, qui permet de lier entre eux deux états quantiques relatifs à deux particules distinctes, possiblement très éloignées l'une de l'autre. Deux particules ainsi intriquées (ou enchevêtrées) forment à elles deux un système physique à part entière.

Isotope : deux éléments chimiques sont dits isotopes quand ils ont le même numéro atomique, c'est-à-dire le même nombre de protons. Ils ont par contre des nombres de neutrons différents.

L

Lacunaire : adjectif utilisé pour définir une structure composée pour l'essentiel de vide. C'est entre autres le cas d'un atome. En effet, un atome est composé essentiellement du vide qui sépare son noyau des électrons.

Lepton : particule dont la caractéristique est d'ignorer l'**interaction forte** (la **force de couleur**). Un lepton peut donc évoluer selon l'une des trois autres forces (interaction faible, électromagnétique, de gravité). L'électron et le **neutrino** sont des leptons. Il existe des **antileptons**.

M

Méson : un méson est un **hadron** dont le spin est en valeur entière. Il est composé d'un nombre pair de **quarks** et d'**antiquarks**.

Mesure quantique : la mesure quantique consiste à évaluer et donc à effectuer la mesure d'un état quantique. À noter que cela a pour effet d'interrompre le comportement quantique du système mesuré.

Modèle de Bohr : théorie constituant une métaphore pédagogique de la constitution de l'atome et en particulier de celui d'hydrogène.

Muon : surnommé l'« électron lourd », il a en effet les mêmes caractéristiques que l'électron à ceci près que sa masse est plus de 200 fois supérieure. C'est un fermion de la famille des leptons ; cette dernière comprend donc le muon, l'électron et le tau.

N

Neutrino : le neutrino est une particule élémentaire dont le représentant le plus célèbre est l'électron. Un neutrino est un fermion de spin en valeur demi-entière. C'est en somme un **lepton**. À noter qu'il y a trois formes (appelées « saveurs ») :

- électronique : l'électron.
- muonique : le muon.
- tauique : le tau.

Neutron : particule subatomique située dans le noyau atomique. Elle est neutre du point de vue de sa charge électrique.

Nombre complexe : un nombre complexe est un nombre qui appartient à l'ensemble des complexes qui est une extension de l'ensemble des entiers et dont le postulat est l'équation $i^2 = -1$. Un nombre complexe s'écrit sous la forme $z = a + i.b$ avec a représentant la **partie réelle** et b la **partie imaginaire**. On peut aussi écrire z en **forme eulérienne** : $z = r \cdot e^{i\gamma}$, avec r le **module** et γ l'**argument**.

Nombre de masse : nombre de nucléons d'un noyau en général noté **A**.

Notation bra-ket ou **formalisme de Dirac** : notation de représentation d'un état quantique qui utilise l'écriture suivante $|\psi\rangle$ pour représenter l'état quantique de ψ .

Nucléons : représente l'ensemble des sous-particules incluses dans le noyau, c'est-à-dire les protons et les neutrons.

Numéro atomique : représente le nombre de protons (et par conséquent le nombre d'électrons) d'un élément chimique. Il est en général noté **Z**.

O

Observable : un observable est une grandeur en physique quantique que l'on peut justement observer et étudier d'un point de vue quantique. La position, l'Hamiltonien associé à l'énergie, la vitesse ou le spin sont des exemples d'observables.

P

Paradoxe EPR ou **paradoxe Einstein-Podolsky-Rosen** : expérience de la pensée imaginée par Albert Einstein, Boris Podolsky et Nathan Rosen qui consiste à conduire l'analyse de phénomènes comme l'intrication ou la superposition quantique à une sorte de contradiction. Par exemple, cela impliquerait de dépasser la vitesse de la lumière ce qui est supposé impossible. Cette contradiction permet à ces trois scientifiques de supposer l'existence de variables cachées à même de totalement expliquer certains phénomènes quantiques.

Particule composite : particule composée de particules élémentaires. Les baryons (composés de trois quarks) en sont un exemple.

Particule élémentaire : particule à la base de ce qu'est une particule composite. Par exemple, un quark est une particule élémentaire qui participe à ce que sont les neutrons (qui sont des particules composites). Ces particules sont toutes soumises à une ou plusieurs des quatre forces fondamentales (gravitation, électromagnétisme, interactions forte et faible).

Photon : le photon est la particule élémentaire des ondes électro-magnétiques en particulier celle de la lumière visible.

Physique quantique : ensemble relatif à la théorie physique de l'infiniment petit. Définie ainsi par opposition à la physique dite classique.

Positron : le positron est l'antiparticule de l'électron. Il a donc une charge électrique positive.

Principe d'exclusion de Pauli : ce principe stipule qu'au sein d'un atome, deux électrons ne peuvent pas être simultanément dans le même état quantique. Ce principe d'exclusion est étendu à d'autres particules élémentaires.

Principe d'incertitude ou **principe d'indétermination** ou **principe d'incertitude de Heisenberg** : ce principe stipule qu'il est impossible dans le monde quantique de connaître simultanément, deux grandeurs d'une particule.

Proton : particule subatomique située dans le noyau atomique et chargée électriquement positivement.

Q

Quark : un quark est une particule élémentaire qui participe à la constitution des particules dites composites qui composent la matière. Par exemple, il y a des quarks à l'intérieur d'un proton ou d'un neutron. Ces particules composites sont rassemblées dans la famille des **hadrons** dans laquelle on trouve entre autres les **baryons** (trois quarks). Il est à ce jour impossible d'isoler un quark et donc de l'observer réellement. On ne le connaît donc que dans la configuration où il est uni à d'autres quarks (typiquement lorsqu'il forme un hadron). Les quarks s'attirent mutuellement via l'**interaction forte** qui est le support de ce que l'on appelle des **gluons**. Il existe six types de quarks : *Down*, *Up*, *Strange*, *Charm*, *Bottom* et *Top*. Compte tenu de la nature de leurs *spins*, ce sont des **fermions**. À noter que l'antimatière comprend six **antiquarks** correspondants.

R

Recuit simulé quantique : réinterprétation quantique d'une heuristique de recherche opérationnelle elle-même issue d'un procédé industriel. Elle permet d'accéder à des temps de calcul très significativement plus rapides que le même algorithme en informatique classique.

Réduction du paquet d'ondes : concept qui explicite le fait que le résultat de la mesure quantique d'un système quantique est réduit totalement à ladite mesure.

S

Sphère de Bloch : cette sphère conçue par le physicien suisse Félix Bloch est placée dans un espace de Hilbert à trois dimensions. Elle est au cœur de la définition d'un bit quantique et de son interprétation notamment en ce qui concerne son état superposé.

Spin : le spin est une caractéristique d'une particule, au même titre que sa vitesse par exemple, envisagée comme étant une sorte de rotation propre de la particule sur elle-même. On évalue sa grandeur selon la **constante de Planck**. Elle prend des valeurs entières ou demi-entières ce qui détermine d'ailleurs certaines catégorisations des particules.

Superposition quantique : la superposition quantique explicite l'idée qu'un état quantique possède plusieurs valeurs observables à la fois d'une même caractéristique, que ce soit sa position ou sa quantité de mouvement par exemple. Cette superposition quantique correspond à une combinaison linéaire probabiliste entre les différentes valeurs mesurables.

Suprématie quantique : la suprématie quantique est la possible situation future dans laquelle les problèmes les plus difficiles seraient résolus plus rapidement par un algorithme quantique, voire auraient une solution atteignable alors même que l'informatique classique est inopérante sur le sujet.

T

Tableau périodique des éléments ou **table de Mendeleïev** : tableau regroupant l'ensemble des éléments chimiques, ordonnés par leurs numéros atomiques.

Tau ou **lepton tau** ou **taupon** : c'est une particule élémentaire de la famille des leptons au même titre que les **électrons** et les **muons**.

Téléportation quantique : mode de communication quantique qui permet, grâce à l'intrication quantique, de transférer un état quantique d'un système à un autre même très éloigné géographiquement. Il ne s'agit pas de transfert de matière, mais bien de transfert de l'état d'un système (à un instant donné).

Théorie du tout : théorie physique se donnant comme objectif de décrire l'ensemble des interactions physiques de la nature. Elle inclut à ce titre les quatre forces fondamentales (gravitationnelle, électromagnétique, interaction faible, interaction forte).

V

Variables cachées : variables dont l'existence est imaginée entre autres par Albert Einstein pour expliquer totalement des phénomènes quantiques comme l'intrication ou la superposition. Peu convaincu par l'interprétation de Copenhague, il réfute la possibilité d'un hasard fondamental et pense au contraire qu'une partie de l'explication n'est pas encore découverte. Il est conforté dans cette vision

par la mise en évidence du **paradoxe EPR**. En l'occurrence ce qui ne serait (ou n'était pas) découvert, sont ces variables cachées.

Vitesse de la lumière : la vitesse de la lumière a une importance fondamentale, car sa valeur d'environ 300 000 kilomètres par seconde est considérée comme indépassable dans la théorie de la relativité restreinte.