

Séance publique du 3 décembre 2018

Mécanique quantique : un monde étrange et pourtant familier

Jean-Pierre NOUGIER

IES, Univ. Montpellier, CNRS, Montpellier, France
Académie des Sciences et Lettres de Montpellier

MOTS CLÉS

Mécanique quantique, incertitude, hasard, mesure, laser, LED, photodétecteur, horloge atomique, IRM.

RÉSUMÉ

Le mouvement des corps, à l'échelle humaine, obéit aux lois de la mécanique classique, qui nous sont familières. Il en est ainsi par exemple des notions de force, de vitesse, de position, de trajectoire. Les particules élémentaires obéissent à des lois différentes, celles de la mécanique quantique : une onde se confond avec une particule, dont on ne peut pas appréhender la trajectoire, une expérience n'est pas reproductible, son résultat ne peut pas être prédit, un système quantique n'a pas de localisation, etc.

Ce monde étrange nous est pourtant familier. Nous sommes en effet entourés d'objets d'usage courant dont nous utilisons les propriétés quantiques : des supercalculateurs aux lasers utilisés en recherche, mais aussi en ingénierie et en médecine, aux CD et DVD, en passant par les diodes électroluminescentes (LEDs), les caméras CCD miniaturisées de nos appareils photos, caméscopes et smartphones, jusqu'aux horloges atomiques à la précision stupéfiante indispensables aux localisation GPS ou au guidage d'engins, et aux appareils d'analyse médicale tels les IRM.

1. Introduction

Les mouvements des corps qui nous entourent sont régis par les lois de la mécanique classique, ou mécanique newtonienne. Il en résulte que ces lois nous sont familières, qu'il s'agisse de notions de force, de trajectoire, de vitesse, d'énergie.

Mais les mouvements des corps de dimensions atomiques n'obéissent pas aux lois de la mécanique classique : ils sont régis par d'autres lois, qui constituent la mécanique quantique. Au second paragraphe ci-dessous, nous allons voir, à partir d'exemples simples, combien ces lois sont étranges et défient le sens commun. Et pourtant, comme nous le verrons au paragraphe 3 suivant, sans nous en rendre compte, nous les utilisons quotidiennement dans les objets de notre vie courante.

2. Les lois étranges de la mécanique quantique

2.1. Pourquoi la mécanique classique est-elle défaillante au niveau atomique ?

Nous recevons en permanence des ondes électromagnétiques, sur nos postes radio, nos postes de télévision, nos smartphones. Les électrons se déplaçant dans une

antenne émettrice génèrent une onde qui induit un courant dans une antenne réceptrice. Ainsi, par leur mouvement, les électrons de l'antenne émettrice communiquent de l'énergie à l'extérieur, donc perdent eux-mêmes de l'énergie. Il en résulte que les électrons d'un atome, tournant autour du noyau, devraient perdre de l'énergie et s'écraser sur le noyau. Or l'expérience montre que les atomes sont stables, donc les particules à l'échelle atomique n'obéissent pas aux lois de la mécanique classique.

C'est au cours du XX^e siècle que les physiciens ont établi les lois de la mécanique quantique. Pour ne citer que quelques grands noms du début de cette épopée : Max Planck, Albert Einstein, Niels Bohr, Louis de Broglie, Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg, Paul Dirac, Wolfgang Pauli, ...

2.2. Ondes ou particules ?

La nature de la lumière a toujours fait débat. Au XVII^e siècle, alors que Christian Huyghens considérait que la lumière était composée d'ondes, Isaac Newton affirmait qu'il s'agissait d'un flot de particules. Vers le milieu du XIX^e siècle, la cause était entendue : les expériences d'interférences et de diffraction (Fresnel, Young) et la théorie des ondes électromagnétiques de Maxwell (1864) montraient sans ambiguïté le caractère ondulatoire de la lumière. N'importe qui peut observer des interférences lumineuses, il suffit de regarder les irisations produites par les sillons d'un compact disque, ou d'observer un lampadaire à travers un voileage.

Après la découverte de l'effet photoélectrique (Heinrich Hertz et son élève Philipp von Lenard en 1887) et du rayonnement du corps noir (Max Planck, 1900), Albert Einstein (1905) affirme que la lumière, considérée alors comme une onde, est aussi une particule (le photon) qui transporte une énergie $h\nu$, où h est la constante de Planck, et ν la fréquence de l'onde lumineuse.

En 1924, Louis de Broglie émet l'hypothèse que, puisque dans certains cas une onde (lumineuse) pouvait se comporter comme une particule, réciproquement une particule devait pouvoir se comporter comme une onde. Effectivement, trois ans plus tard, en 1927, Davisson et Germer réalisent des expériences de diffraction à partir de faisceaux d'électrons. On fabrique aujourd'hui des microscopes électroniques, mille fois plus puissants que les microscopes optiques.

Ainsi toute onde peut se comporter comme une particule et réciproquement.

2.3. Principe d'incertitude de Heisenberg et quelques conséquences

Une quantité quelconque, par exemple la position d'une particule, ou sa vitesse, ne peut pas être déterminée avec une précision absolue : chaque mesure est entachée d'une erreur, ou incertitude, qui dépend de l'appareil de mesure. Le principe d'incertitude de Heisenberg, présenté en 1927, stipule qu'il est *impossible* de mesurer à la fois la position et la vitesse d'une particule avec une précision absolue. Si la précision sur l'une des deux quantités augmente, celle sur l'autre quantité diminue, et ceci *quel que soit l'appareil de mesure utilisé* : il s'agit là d'une incertitude intrinsèque, fondamentale, qui n'est *en aucune manière liée à un quelconque appareil de mesure*.

Ce principe, jusqu'à présent jamais démenti par l'expérience, a plusieurs conséquences surprenantes. Par exemple : un électron E , soumis à aucune force, se dirige en ligne droite à vitesse constante suivant la direction Oz (figure 1). À un instant donné, on sait que sa position suivant la direction perpendiculaire Ox vaut $x = 0$ et que sa vitesse dans la direction Ox vaut $v_x = 0$: le principe d'incertitude de Heisenberg nous dit qu'il est

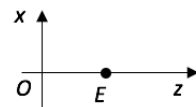


Figure 1 : électron se déplaçant suivant l'axe Oz

impossible de connaître à la fois exactement x et v_x , donc que cet électron ne peut pas avoir une trajectoire rectiligne.

En mécanique classique, on sait parfaitement définir la trajectoire d'une planète, c'est son orbite (figure 2a). En mécanique quantique, on ne sait pas définir la trajectoire d'un électron, mais on pourra calculer la probabilité que l'électron se trouve à tel ou tel endroit : cette probabilité pourra se matérialiser par une densité de points plus ou moins grande, ou par un dégradé (figure 2b). On définit l'orbitale comme le volume de l'espace où la probabilité de trouver l'électron est au moins égale à 95 % (figure 2c).

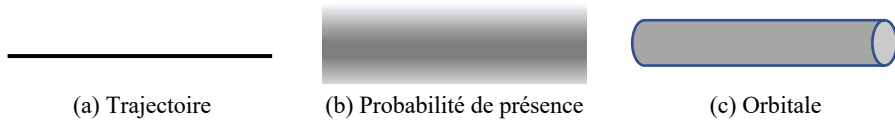


Figure 2 : Trajectoire d'un mobile (a), probabilité de présence d'un électron (b), orbitale électronique (c)

Une autre conséquence surprenante du principe d'incertitude est que le repos n'existe pas, puisqu'au repos une particule possède une position bien définie et une vitesse nulle, or on ne peut pas connaître à la fois sa position et sa vitesse.

2.4. Quantification des états

Pour envoyer un satellite tourner autour de la Terre, il faut lui communiquer une certaine énergie. Un électron qui tourne autour du noyau possède aussi une énergie. La mécanique quantique nous apprend que ces énergies sont quantifiées (d'où le nom de mécanique quantique), c'est-à-dire ne peuvent pas prendre n'importe quelle valeur, mais seulement des valeurs bien définies E_1, E_2, E_3 , etc., et pas des valeurs intermédiaires.

On peut faire passer un électron d'un niveau d'énergie E_n à un niveau d'énergie $E_{n+1} > E_n$, en lui communiquant la différence d'énergie $E_{n+1} - E_n$, par exemple en le chauffant, ou en appliquant un champ électrique, ou en le bombardant par des photons (c'est-à-dire en lui apportant une énergie lumineuse). L'électron est alors dans un état excité. Il peut aussi se désexciter, c'est-à-dire passer d'un état d'énergie E_{n+1} à un état d'énergie inférieure E_n , dans ce cas il émet un photon (c'est-à-dire une onde lumineuse) de fréquence ν telle que :

$$E_{n+1} - E_n = h\nu \quad (1)$$

Où h est la constante de Planck ($h = 6,02 \times 10^{-34}$).

2.5. Dieu ne joue pas aux dés : il fait pire encore

La démarche scientifique consiste, en général, à écrire des lois, c'est-à-dire à déceler, derrière un apparent désordre ou un apparent hasard, un processus déterministe, que l'on peut résumer ainsi : *les mêmes causes produisent les mêmes effets*. Or le principe d'incertitude de Heisenberg contredit cette évolution déterministe, en introduisant une indétermination fondamentale. Einstein lui-même rejetait le principe de cette indétermination, en déclarant « Dieu ne joue pas aux dés » [1].

Il est possible d'appréhender cette incertitude quantique fondamentale de façon simple à l'aide de la lumière polarisée. Cette polarisation est un phénomène connu et utilisé, donnons en trois exemples :

– La lumière du ciel est en partie polarisée. C'est pour cette raison que les photographes utilisent des filtres polariseurs afin d'assombrir plus ou moins le ciel sur les photographies, et modifier ainsi le contraste.

- La lumière polarisée est utilisée pour observer des images projetées en relief, au moyen de deux projecteurs munis de polariseurs orientés perpendiculairement l'un à l'autre. Les spectateurs portent chacun une paire de lunettes polarisantes dont les deux verres sont des filtres polariseurs orientés dans les directions correspondantes.
- Les ondes électromagnétiques utilisées en télévision terrestre (analogique ou numérique) ou par satellite, sont polarisées, en général horizontalement (d'où les antennes "râteau" horizontales).

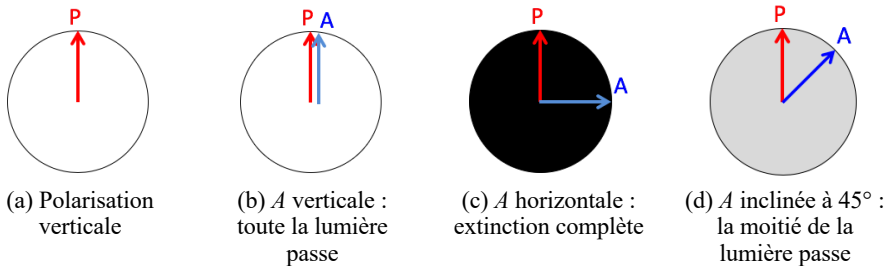


Figure 3 : Lumière polarisée suivant la direction P , vue à travers un polariseur A pour différentes orientations de A .

Supposons qu'un faisceau lumineux soit polarisé verticalement : ceci peut être aisément obtenu en interposant, sur le trajet d'un faisceau lumineux quelconque, un filtre polariseur P orienté verticalement (figure 3 a). Imaginons que nous recevions ce faisceau polarisé mais que nous ignorions sa direction de polarisation : comment la déterminer ? Un photographe répondrait facilement à cette question : il suffit d'interposer, sur le trajet de ce faisceau, un autre filtre polariseur A (appelé "analyseur"), et de le faire tourner :

- lorsque la polarisation de l'analyseur A est verticale, il laisse passer toute la lumière, l'intensité lumineuse à la sortie est maximale (figure 3 b). En termes de photons, cela signifie que l'analyseur laisse passer tous les photons ;
- lorsque la polarisation de l'analyseur A est horizontale, aucune lumière ne passe, il y a extinction totale (figure 3 c), aucun photon ne traverse l'analyseur, tous sont bloqués ;
- ayant ainsi repéré la polarisation (verticale) du faisceau, orientons l'analyseur à 45° par rapport à cette verticale (figure 3 d). Dans ce cas la moitié de la lumière passe, l'intensité lumineuse à la sortie de l'analyseur est la moitié de celle du faisceau incident, et la lumière sortant de l'analyseur est polarisée suivant la direction A . En termes de photons, cela signifie que la moitié des photons traverse l'analyseur, l'autre moitié est bloquée, et que les photons ayant traversé l'analyseur sont, à sa sortie, polarisés suivant la direction A . Autrement dit, un photon a une chance sur deux d'être bloqué par l'analyseur, et une chance sur deux de le traverser. Que se passe-t-il si le faisceau incident est composé d'un seul photon ? Il a 50 % de chances de traverser l'analyseur, et 50 % de chances d'être bloqué : si l'on fait l'expérience avec un photon, il se peut qu'il passe, et si l'on répète la même expérience dans les mêmes conditions avec un second photon, il se peut qu'il soit bloqué, donc que le résultat de la seconde expérience soit différent de celui de la première. De plus, si le photon traverse l'analyseur, il est polarisé suivant la direction de l'analyseur, c'est-à-dire que sa polarisation a changé.

Nous avons ainsi obtenu trois résultats fondamentaux qui ont été généralisés et constituent des postulats de la mécanique quantique, encore jamais mis en défaut en dépit de milliers d'expériences réalisées depuis :

- 1) Lorsqu'on effectue une mesure sur un système quantique, en général on ne connaît pas le résultat final, on peut trouver une valeur parmi un grand nombre de valeurs possibles,

chacune avec une certaine probabilité. Cette probabilité est une caractéristique intrinsèque de la mesure, elle n'a rien à voir avec une quelconque incertitude liée à l'appareil de mesure. Cela signifie que la même cause n'a pas forcément les mêmes effets.

2) Le résultat de la mesure modifie en général l'état du système.

3) La moyenne des résultats possibles portant sur un grand nombre de systèmes quantiques (ici un faisceau lumineux) redonne le résultat de la mesure "classique".

Ce résultat est bien pire que le jeu de dés. En effet, on pourrait imaginer que, si l'on connaissait exactement l'état initial du dé, l'état de la table sur laquelle il tombe (frottement, aspérités, etc.), on serait capable de prédire le résultat. Ici, il est impossible de pouvoir prédire quoi que ce soit, l'incertitude est de nature fondamentale.

Ainsi le monde quantique est-il bien étrange : des objets qui se comportent tantôt comme une onde, tantôt comme une particule, qui n'ont pas de trajectoire, où le repos est interdit, où la causalité n'existe pas...

Il existe aussi bien d'autres propriétés sur lesquelles je ne m'étendrai pas ici : la délocalisation quantique, les états intriqués, la téléportation d'information, le "don d'ubiquité", etc. (voir par exemple [2]).

3. Un monde familier

Et cependant, ce monde aux lois si étranges nous est paradoxalement familier. Nous allons en donner quelques exemples.

3.1. Semiconducteurs

Les semiconducteurs sont des matériaux artificiels conçus grâce aux lois de la mécanique quantique. Nous avons vu que les électrons, dans un atome, ne peuvent occuper que des niveaux d'énergie bien définis. Dans un matériau semiconducteur, constitué d'atomes couplés entre eux, ils ne peuvent occuper que des bandes d'énergie permises, séparées entre elles par des bandes d'énergie interdites (figure 4). Élaborer un matériau semiconducteur revient à réaliser de l'ingénierie de bandes, consistant à construire un matériau, ou un ensemble de couches de matériaux, dont la structure de bande répond aux besoins recherchés.



(a) Niveaux d'énergie dans un atome

(b) Bandes d'énergie dans un semiconducteur

Figure 4 : Structure de bande schématisée d'un semiconducteur : (a) dans un atome les électrons ne peuvent occuper que des niveaux d'énergie E_1 , E_2 , etc. séparés par des bandes d'énergies interdites ; (b) dans un semiconducteur, ils peuvent occuper des bandes d'énergie permises, séparées par des bandes interdites.

Cette découverte a révolutionné l'électronique. Tous les composants de l'électronique moderne sont réalisés à l'aide de matériaux semiconducteurs. On les trouve donc dans l'électroménager, les voitures, les avions, les smartphones, les ordinateurs, il n'est pratiquement aucun objet courant qui ne contienne des composants électroniques à semiconducteurs. Il n'y aurait pas de semiconducteurs sans mécanique quantique, et la

mécanique quantique n'aurait pas connu les immenses développements qui ont vu le jour, sans les semiconducteurs.

3.2. Ordinateurs

Les ordinateurs sont réalisés à partir de circuits intégrés utilisant le silicium comme semiconducteur. Les ordinateurs et calculateurs nous sont familiers, les supercalculateurs le sont moins, et pourtant !

Chaque trimestre paraît le classement des plus gros ordinateurs du monde. Le premier rang, en juin 2018 [3], est détenu par le supercalculateur américain d'IBM "Summit", installé à Oak Ridge National Laboratory, d'une puissance de l'ordre de 200 pétaflops : cela signifie qu'il est capable d'exécuter 200 millions de milliards d'opérations par seconde ! En admettant que chacun des 7 milliards d'individus sur terre puisse effectuer une opération (par exemple $56\,292,354 \div 6\,748,2635$) en 30 secondes, il faudrait 27 ans à l'humanité entière (sans dormir ni manger !) pour effectuer autant d'opérations que cette machine en une seconde ! A titre de comparaison, la puissance d'un ordinateur portable (PC) aujourd'hui est de l'ordre de 25 Gflops, soit 25 milliards d'opération par seconde : "Summit" calcule 8 millions de fois plus vite ! Le coût est à la hauteur des performances : 280 M\$. Notons au passage que nos PC d'aujourd'hui auraient été considérés comme des supercalculateurs en 1995....

Mais l'on ne va pas s'arrêter là : l'évolution du top 500 [3] depuis 1994 montre que l'on gagne un facteur 10 en puissance de calcul tous les 4 ans. Une puissance 5 fois plus élevée, c'est-à-dire 1 exaflop, est déjà en préparation dans plusieurs pays [4], avec des investissements considérables : 3 G\$ (milliards de dollars) pour les USA et la Chine, 1 G\$ pour le Japon, 1 G\$ pour l'Union Européenne.

Mais à quoi peut servir une telle puissance de calcul ? Les applications sont légion, aussi bien dans le domaine de la recherche que dans le domaine industriel. Citons-en quelques-unes :

a) *Domaine de la recherche*

- Chimie : simulation des réactions chimiques à partir de la structure des atomes.
- Nouveaux matériaux : simulation du comportement à partir de la modélisation des atomes le constituant (aujourd'hui, on modélise à peine quelques centaines d'atomes).
- Médecine personnalisée à partir de l'analyse du génome pour prévoir les vulnérabilités et quelle molécule il faut administrer en cas de pathologie.
- Simulations physiques : calculs aérodynamiques, résistance des matériaux, étude de la fusion nucléaire. Depuis 2012 par exemple, on sait modéliser l'évolution de l'Univers depuis le big-bang grâce aux supercalculateurs.
- En 2015 étaient détectées pour la première fois, par l'interféromètre américain LIGO, des ondes gravitationnelles, dont l'existence est considérée comme l'une des preuves de la validité de la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein. Cette mise en évidence a été faite grâce à l'analyse de signaux par un supercalculateur : en effet, suite à la collision de deux trous noirs, l'espace-temps a été ébranlé, des ondes gravitationnelles ainsi générées se sont propagées, et ont modifié la longueur (égale à 4 km) des bras de l'interféromètre LIGO, d'une quantité de l'ordre du millième de la taille d'un atome, qu'il a fallu déceler parmi les fluctuations naturelles bien supérieures ! Par ailleurs, une équipe de l'Université de Cardiff [5] a également utilisé un supercalculateur pour effectuer des simulations de collisions de trous noirs, confirmant que les signaux détectés par l'interféromètre américain étaient effectivement des ondes gravitationnelles.
- Le 4^e supercalculateur de recherche français occupe le 70^e rang mondial (24^e rang européen), avec 3,57 pétaflops, c'est celui du CINES (Centre d'Informatique National de

l'Enseignement Supérieur) installé à Montpellier, qui a pour missions l'archivage pérenne des documents administratifs de l'enseignement supérieur français, et le calcul hautement parallèle pour les laboratoires de recherche.

b) Domaine industriel

– La France possède 12 supercalculateurs dans le "Top 200" (juin 2018 [3]), dont 6 appartiennent au CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique), parmi lesquels le plus gros ordinateur français, Téra 1000-2 (23,4 petaflops, 14^e mondial). Autant dire que les simulations militaires, en particulier en termes d'armement nucléaire, ne sont pas étrangères à cette situation [6]. Le programme "Simulation" du CEA est constitué par un ensemble de logiciels reproduisant les différentes phases de fonctionnement d'une arme nucléaire, pour le maintien de la capacité de la dissuasion nucléaire de la France, notamment avec le Laser Mégajoule (LMJ) [7].

Mais le complexe de calcul du CEA à Bruyères-le-Châtel abrite également le "Très Grand Centre de Calcul", qui permet au CEA et aux industriels (ex : Areva, Airbus, EDF, L'Oréal, Safran, Thales, Valeo, etc.) de partager leurs compétences et moyens de simulation numérique.

Les ordinateurs du CEA sont aussi utilisés pour la recherche fondamentale, avec la plateforme centrale d'hébergement et de traitement des données de génomiques, issues du projet national « France Génomique ». Par ailleurs, un des objectifs du laser Mégajoule est de pouvoir obtenir la fusion nucléaire par confinement inertiel [7].

– Industrie pétrolière : le 2^e supercalculateur français "Pangea", se situe au 30^e niveau mondial (6,7 pétaflops). Il est installé à Pau, dans les locaux du groupe Total. Pangea reconstitue des images du sous-sol et effectue des simulations de gisement à partir de données sismiques. Il sert également à accroître l'efficacité de la production d'hydrocarbures, la sécurité des forages et à diminuer les impacts sur l'environnement. C'est un outil d'aide à la décision pour l'exploration et la gestion des champs pétrolifères.

– Météorologie : Météo-France possède 2 ordinateurs à 2,5 pétaflops, se situant aux 81 et 82^e rangs mondiaux. La difficulté des prévisions météo est quadruple : d'une part il faut traiter un nombre considérable de données (typiquement une vingtaine de millions), d'autre part il faut résoudre un nombre considérable d'équations, de plus les phénomènes sont tellement complexes qu'il faut les simplifier, enfin le tout doit être traité assez vite pour que la prédiction n'arrive pas après l'évènement. Entre 1992 et fin 2016, la puissance de calcul théorique de Météo-France a été multipliée par plus de 2 500 000. Ainsi, on gagne un jour de prévision tous les 10 ans. Mais on a bien vu, notamment lors des récentes inondations dans l'Aude, que la puissance de calcul est encore insuffisante pour modéliser et localiser correctement les évènements exceptionnels.

– Automobile : pour tester la résistance mécanique des 150.000 pièces que compte en moyenne une voiture, tous les constructeurs utilisent aujourd'hui des supercalculateurs pour modéliser les crash-tests qui précèdent la mise sur le marché d'un nouveau modèle ; en moyenne 10 000 tests sur ordinateur sont nécessaires pour être en mesure de sortir un nouveau modèle. Pour Philippe Lavocat, le PDG du Genci, l'organisme qui pilote l'équipement de la France en calcul intensif [4] : « Grâce à la simulation numérique du crash-test, Renault épargne trois ans et demi sur le développement de ses voitures. Cela donne une idée de l'avantage économique du calcul intensif. »

3.3. Lasers

Tous les lasers, qu'ils soient à cristaux naturels ou à semiconducteurs, fonctionnent sur le même principe de mécanique quantique : on excite les électrons, c'est-à-dire qu'on leur donne de l'énergie pour les amener sur un niveau d'énergie élevé

E_2 , puis on les « stimule » pour qu'ils redescendent tous en même temps sur un niveau d'énergie plus faible E_1 , d'où le nom de LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Ils émettent alors une lumière dite « cohérente » (parce qu'ils sont synchronisés, contrairement aux ampoules électriques par exemple où les électrons excités se désexcitent de façon aléatoire). Les applications des lasers sont innombrables, citons-en quelques-unes :

– **Téléométrie Laser :**

Le « laser-lune » de l'observatoire de la côte d'Azur, installé sur le plateau de Calern près de Grasse, a pour but la détermination précise de la distance terre-lune et de ses variations [8]. Une impulsion lumineuse est émise depuis la Terre vers un réflecteur installé sur la Lune, la lumière réfléchie est détectée, on mesure le temps t séparant l'émission de la réception, d'où l'on déduit la distance Terre-Lune : $D = ct/2$, où c est la vitesse de la lumière. La précision obtenue sur la mesure de t est de l'ordre de 10^{-11} secondes (soit un centième de milliardième de seconde !) ce qui donne une précision sur la mesure de D de l'ordre de 4 mm sur une distance de 381 000 km. On pourra trouver des informations sur les problèmes de mesure dans [9]. Ces mesures permettent d'étudier l'orbite et les mouvements de la Lune, de vérifier avec une précision de 10^{-13} la théorie de la relativité générale d'Einstein, ou de voir que la Lune s'éloigne de la Terre de quelques centimètres chaque année.

Un large réseau d'observatoires utilise le même principe de téléométrie laser pour assurer le suivi précis des trajectoires de satellites artificiels, la coordination se faisant à l'échelle internationale.

Mais la téléométrie laser nous concerne aussi dans le domaine courant : les cinéomètres utilisent un rayonnement laser infrarouge pour mesurer la vitesse des véhicules sur route ; la téléométrie laser est utilisée pour corriger les tirs d'artillerie ; les bons vieux décamètres ont disparu : ils sont remplacés par des téléomètres laser, utilisés par les chasseurs, les golfeurs, dans l'industrie du bâtiment, avec des appareils commerciaux pour des prix allant de 30 € à plusieurs centaines d'euros.

– **Guidage laser :**

Un laser éclaire une cible (désignation laser). Les munitions détectent la tâche, dont la fréquence est très spécifique, et calent leur trajectoire sur elle. Cette désignation peut se faire soit par le tireur (avion, char, fantassin), soit par un observateur extérieur.

Le pointeur laser utilisé par les conférenciers entre dans la même catégorie, on utilise alors un laser émettant dans le domaine visible (rouge en général).

– **Laser de puissance :**

Il est utilisé dans l'industrie pour la découpe (découpe de tôle, désincarcération de voitures, etc.), ou pour la soudure. Le laser permet de concentrer une grande énergie sur une très petite surface. Ce procédé permet une découpe précise, nette et rapide de nombreux matériaux jusqu'à plusieurs centimètres d'épaisseur. Elle se fait sans effort sur la pièce et le chauffage est très localisé (de l'ordre de 0,5 mm sur les métaux), ce qui permet d'avoir des pièces très peu déformées.

– **Chirurgie laser :**

Le laser est actuellement couramment utilisé en chirurgie oculaire, notamment pour modifier la cornée de façon très précise afin de corriger des défauts de la vue, par sculpture de la cornée. Il est aussi utilisé en chirurgie esthétique (épilage, lifting, etc.).

– **Transmission de l'information :**

Le transport d'information à haut débit se fait aujourd'hui par fibre optique. La lumière incohérente ne peut pas pénétrer loin dans une fibre, seul un laser permet

d'injecter de la lumière sur de longues distances. Le débit d'information peut varier couramment entre 30 Mb/s et 1 Gb/s. En 2017, 99,8 % du trafic internet international transitait via 366 câbles sous-marins soit plus d'un million de kilomètres de câbles à fibre optique posés au fond des océans. A titre d'exemple, la capacité de stockage d'un DVD (= un film de 2 heures) est de 4,7 GO, soit $4,7 \times 8 = 37,6$ Gbits. Une fibre optique de débit 1 Gb/s peut transférer l'intégralité de ce DVD en 37,6 s. Fin 2017, Facebook et Microsoft ont collaboré pour installer un câble de 6 600 kilomètres de long reliant l'Amérique du Nord à l'Europe, avec un débit théorique record de 160 Tbit/s [10] (soit 160 millions de millions de bits par seconde, permettant le transfert de 4 250 DVD par seconde).

– **Gravure et lecture de CD et DVD :**

Les CD et DVD remplacent les microsillons par des alvéoles qui créent des zéros et des uns. La gravure et la lecture de ces alvéoles s'effectuent par laser.

3.4. Diodes électroluminescentes (LEDs)

Les LEDs sont des composants à semiconducteurs, basés sur le même principe que les lasers : des électrons excités sur un niveau d'énergie E_2 redescendent sur un niveau d'énergie inférieur E_1 , et ce faisant émettent une onde lumineuse de fréquence ν donnée par la relation (1). La différence est que, alors que dans les lasers tous les électrons excités sont désexcités en même temps par stimulation, dans les LEDs ces électrons se désexcitent spontanément de façon aléatoire, comme les électrons de nos vieilles lampes à filament.

Les LEDs possèdent trois atouts considérables par rapport aux anciennes lampes et tubes à néon :

- d'une part la possibilité d'émettre de la lumière de différentes couleurs, par combinaison des couleurs fondamentales rouge, vert, bleu ;
- d'autre part une durée de vie environ dix fois supérieure aux lampes à filament ;
- enfin un rendement très élevé : alors que 90 % de l'énergie électrique consommée par les lampes à filament était gaspillée en chaleur, 90 % de l'énergie consommée par les LEDs est utilisée pour éclairer : le rendement des LEDs atteint 130 lumens/watt, comparés aux 15 lumens/watt des lampes à incandescence à filament de tungstène. Il faut donc dépenser beaucoup moins d'énergie électrique, pour un même éclairage, avec une LED qu'avec une lampe à incandescence.

Ceci explique que les LEDs envahissent tout le domaine de l'éclairage : éclairage public, panneaux publicitaires, panneaux de décoration lumineuse.

3.5. Récepteurs de lumière

Alors que les émetteurs de lumière (lasers, LEDs) convertissent l'énergie électrique en énergie lumineuse, les récepteurs de lumière convertissent l'énergie lumineuse en énergie électrique. Dans ce cas, une onde lumineuse de fréquence ν percutant un électron sur un niveau d'énergie E_1 lui communique une énergie $h\nu$ et le fait passer sur un niveau d'énergie E_2 conformément à la relation (1). Si cette énergie $h\nu$ est suffisamment grande, l'électron est arraché de l'atome auquel il est lié, il est libéré et conduit l'électricité si on applique un champ électrique.

– **Photodiodes (ou photodétecteurs) :**

Les utilisations sont nombreuses : photomètres pour mesurer l'intensité lumineuse, détecteur de mouvement, vision infra-rouge (applications en combat nocturne, détecteur d'intrusion, détecteur de fuites thermiques, etc., ...).

– **Cellules photovoltaïques :**

Ce sont des photodétecteurs qui fonctionnent dans le spectre de lumière visible, elles constituent l'une des alternatives aux énergies fossiles pour la production d'électricité, ce sont les panneaux solaires bien connus du public. Si tous les toits existant actuellement au monde étaient recouverts de panneaux solaires, les besoins actuels de l'humanité en électricité seraient satisfaits : en une heure, la Terre reçoit du Soleil autant d'énergie que ce que consomme l'humanité en un an.

– Photographie numérique :

La pellicule argentique de nos anciens appareils photo est remplacée aujourd'hui par une matrice CCD (dispositif à charges couplées, figure 5) : chaque grain d'argent est remplacé par un ensemble de trois photodiodes constituant un pixel, sensibles respectivement au rouge, au vert et au bleu. La lumière reçue par chaque photodiode crée un paquet d'électrons proportionnel au nombre de photons reçus dans la fréquence (= la couleur) correspondante. Ces paquets d'électrons sont localisés et comptabilisés, puis traduits en un fichier numérique. C'est ainsi que fonctionnent nos appareils photos, caméscopes, caméras vidéo, scanners, etc.

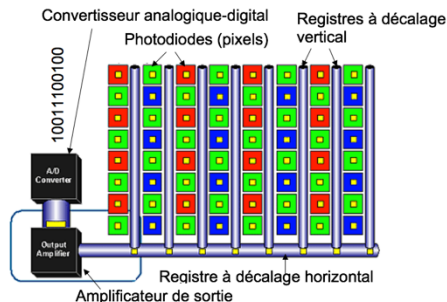


Figure 5 : Schéma d'une matrice CCD (plaque photographique numérique moderne)

3.6. Métrologie quantique

a) Unités de mesure

La métrologie est la science de la mesure. Toute mesure nécessite de définir un préalable une unité, un étalon. Autrefois, l'unité de mesure se référait à une quantité caractéristique d'un personnage célèbre, par exemple un roi ou une reine. On a ainsi défini le pied, le pouce, la coudée, le stade pour les dimensions plus grandes. Un premier bouleversement est intervenu avec la Révolution Française, qui a supprimée quelque 800 unités disparates à travers le royaume de France [11], pour les remplacer par un système décimal, à partir de constantes considérées alors comme universelles. Ainsi, le mètre a été défini comme la dix-millième partie du quart de la circonférence terrestre, la seconde comme la 86 400^e partie du jour. Jusqu'à ce qu'on se rende compte que la Terre n'est pas parfaitement sphérique, que la durée de sa révolution n'est pas exactement de 24 heures et que de plus elle varie légèrement dans le temps (elle dure 16'23" de moins le 4 novembre et 14'22" de plus le 11 février » [12]) : en d'autres termes, ces étalons sont apparus eux aussi comme étant arbitraires, et des réformes successives ont eu pour but d'utiliser des étalons de mesure plus stables et plus fondamentaux.

b) La mesure du temps

Le temps se mesure en comptant un phénomène régulier, par exemple l'écoulement des grains de sable dans un sablier, ou encore les oscillations d'un système (balancier, oscillateur à quartz, ...). Finalement, le système retenu a été la fréquence émise par la transition électronique entre deux niveaux énergétiques de l'atome de césium 133, dont la fréquence mesurée était 9 192 631 770 Hz, soit un peu plus de 9 milliards d'oscillations par seconde. Lors de la 13^e conférence générale des poids et mesures, en 1967, c'est cette quantité qui a été utilisée comme nouvelle définition de la seconde : « La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 ». Ainsi la fréquence associée à cette transition atomique n'est

plus mesurée égale à 9 192 631 770, mais elle est *par définition* égale à cette valeur. C'est donc la mécanique quantique qui définit la durée de la seconde.

c) La mesure des distances

C'est maintenant la vitesse de la lumière c qui permet de définir des longueurs, comme par exemple la distance Terre-Lune. Lors de la 17^e réunion de la conférence générale des poids et mesures de 1983, cette valeur de c a été décrétée non pas comme le résultat d'une mesure, mais comme une définition du mètre : « le mètre est la longueur du trajet parcouru par la lumière dans le vide pendant une durée d'un 299 792 458^{ème} de seconde. ».

d) Les nouveaux étalons du système d'unités internationales

Les différentes grandeurs sont définies à partir de 7 unités de base : mètre (longueur), kilogramme (masse), seconde (temps), ampère (intensité de courant électrique), kelvin (température), mole (quantité de matière) et candéla (intensité lumineuse). Lors de la 26^e conférence générale des poids et mesures, qui s'est tenue du 13 au 16 novembre 2018, ces unités ont, sur proposition du comité international des poids et mesures, été définies de façon indirecte à partir de 7 constantes fondamentales auxquelles on affecte des valeurs arbitrairement exactes, en fait égales aux valeurs obtenues par les meilleures mesures actuelles. Nous en avons déjà vu deux exemples, la seconde définie à partir de la transition du césium 133, le mètre défini à partir de la vitesse de la lumière. Il s'agit en somme de remplacer les anciennes constantes considérées alors comme universelles (longueur du méridien terrestre, période de rotation de la Terre, etc.) par d'autres constantes considérées comme plus universelles et fondamentales [11][13], chacune reliée à une unité (ici entre parenthèses) : césium 133 (seconde), vitesse de la lumière c (mètre), constante de Planck h (kilogramme), charge élémentaire de l'électron e (ampère), constante de Boltzmann (degré Kelvin), »nombre d'Avogadro (mole), efficacité lumineuse d'un rayonnement monochromatique (candéla).

3.7. Horloge atomique

Une horloge atomique est un système qui mesure le temps à partir des transitions énergétiques (équation (1)) entre les électrons du matériau utilisé pour constituer l'horloge (césium 133 par exemple).

L'horloge la plus précise du monde est située au National Institute of Standard and Technology (NIST), elle dévie de 1 seconde en 15 milliards d'années ! Les horloges atomiques commercialement disponibles (on en trouve à partir de 1 000 €) ont une précision qui peut être meilleure qu'une seconde tous les trois millions d'années ! Mais à quoi sert une horloge atomique ? Donnons-en quelques exemples :

a) Temps officiel

Les horloges atomiques servant à déterminer le temps officiel constituent aujourd'hui un réseau de 350 instruments à travers le monde [12] : le bureau international des poids et mesures récolte chaque jour leurs données, en effectue la moyenne : c'est le temps universel coordonné (UTC). Ce temps est très précieux : Google répond ainsi à 7 milliards de demandes automatiques de synchronisation d'ordinateurs par jour.

b) Géolocalisation

Tout le monde utilise ou connaît le GPS (Global Positioning System, ou Géolocalisation par satellite) : c'est un système américain, mis en place en 1973 par le département de la défense, utilisant un système de 24 satellites placés sur 6 orbites circulaires, ainsi 12 satellites peuvent être vus à tout instant de chaque point de la Terre. Il est opérationnel depuis 1995 et ouvert au civil depuis 2000. Conscients de l'intérêt

stratégique d'un tel système, l'Europe, la Russie, la Chine et l'Inde développent des systèmes concurrents. Le système de l'Union Européenne, dénommé Galileo, d'un coût de l'ordre de 5 milliards d'euros, est opérationnel depuis décembre 2016, il fournit une précision de 4 m horizontalement (contre 10 au système GPS) et 8 m en altitude. Le 18 juin 2018, Galileo comptait déjà 200 millions d'utilisateurs, contre 100 millions six mois auparavant [14][15].

Le principe de fonctionnement de la géolocalisation est le même que celui de la mesure de la distance Terre-Lune, il consiste à mesurer un temps pour en déduire une distance. Un satellite A envoie régulièrement des informations du type : « *je suis le satellite N°"XX.", au prochain "top" je serai à telle position et il sera telle heure pour moi "TOP"* ». Le récepteur note l'heure de réception du "TOP", et à partir du décalage Δt entre l'émission et la réception du "TOP", calcule sa distance au satellite $D = c \Delta t$. La localisation se fait par triangulation à partir de 3 satellites (plus un quatrième pour vérification). La lumière voyageant approximativement à 300 millions de mètres à la seconde, cela signifie qu'en un millionième de seconde, elle parcourt 300 m. Donc une erreur d'un millionième de seconde (soit 10^{-6} seconde) sur la mesure du temps entraîne une erreur de 300 m sur la position : si l'on veut avoir une précision de 3 m sur la position, il faut que l'erreur sur la mesure du temps soit inférieure à un centième de millionième de seconde (soit 10^{-8} seconde). A partir de stations au sol, on recale les horloges des satellites à chaque révolution ; un satellite accomplit un tour complet autour de la Terre en un temps de l'ordre de 12 heures (cela dépend de son altitude de croisière, environ 12 heures pour les satellites GPS, 13 heures pour les satellites Galileo). Il faut donc que les horloges des satellites varient de moins de 10^{-8} secondes en 12 heures, leur précision doit donc être meilleure que 1 seconde sur 12×10^8 heures, c'est-à-dire de 1 seconde sur 137 000 ans ! Si l'on souhaite une localisation avec une précision de 30 cm, il faut une horloge 10 fois plus précise. Seules les horloges atomiques sont capables d'une telle précision. Sans horloges atomiques, il n'y aurait pas de géolocalisation possible. Il n'y aurait pas non plus de géolocalisation possible sans la définition précise des unités de temps (la seconde par le césium 133), et de longueur (le mètre par la vitesse de la lumière).

Bien entendu, comme dans toute mesure, il y a des sources d'erreur, le lecteur pourra s'en faire une idée en lisant par exemple les articles [16] et [17]. Une erreur systématique est liée à la théorie de la relativité restreinte, selon laquelle le temps ne s'écoule pas de la même manière dans deux repères en mouvement l'un par rapport à l'autre. Si les horloges terrestre et satellitaire sont synchronisées, au bout d'une révolution du satellite, à la vitesse $v = 3900$ m/s, qui par rapport à l'horloge à terre a duré $t = 12$ heures, l'horloge du satellite indique un temps t' égal à 12 heures plus 3,65 microsecondes : un tel écart entre les deux horloges est aisément mesurable, c'est un excellent moyen de vérifier expérimentalement la théorie de la relativité restreinte ; mais surtout, cet écart de 3,65 μ s se traduit en distance par un écart de 1 094 m, incompatible avec la précision requise. Ceci nécessite donc de corriger en permanence l'indication horaire du satellite.

La géolocalisation sert :

- Aux déplacements, à pied, en voiture, en bateau ou en avion,
- Aux études géodésiques,
- Aux études scientifiques (étude de migrations, déplacements, localisation d'animaux)
- A la conduite de systèmes d'armes (missiles tactiques, bombes, etc.). On voit en particulier, dans le domaine militaire, l'intérêt de disposer d'un système de géolocalisation qui ne dépende pas d'une puissance étrangère.

c) Synchronisation des réseaux de télécommunications

De même qu'un réseau ferré transporte des marchandises et des passagers par paquets dans des trains séparés les uns des autres, de même un réseau de télécommunication découpe les messages en paquets pour les acheminer. De même que les trains doivent être synchronisés pour éviter les collisions et assurer un trafic fluide, de même les paquets d'information qui voyagent à travers les réseaux doivent être synchronisés pour être dirigés vers les bons aiguillages, ne pas se mélanger, etc. Cette synchronisation nécessite des horloges atomiques dont la précision atteint une seconde tous les 3 000 ans (20 milliards d'objets connectés à synchroniser chaque année).

d) Datation des transactions bancaires

Elles nécessitent des précisions de l'ordre de la microseconde.

e) Variations de g

La théorie de la relativité générale de Einstein prévoit que l'écoulement du temps dépend de l'accélération à laquelle on est soumis. Des horloges atomiques de précision 1 seconde sur 300 millions d'années permettent de détecter une variation d'accélération de la pesanteur sur une différence d'altitude de 2 cm ! D'une part ceci permet de confirmer la théorie de la relativité générale, d'autre part on peut envisager de détecter, grâce à des horloges atomiques, des mouvements de plaques tectoniques, des séismes, des éruptions volcaniques.

L'ensemble de ces applications nous montre que les horloges atomiques ont révolutionné notre rapport au temps : il ne bat plus au rythme de la rotation de la terre mais au rythme de l'atome de césium 133 !

3.8. Imagerie par résonance magnétique (IRM)

L'imagerie par résonance magnétique bénéficie du concours de trois effets quantiques : le spin des atomes d'hydrogène, la supraconductivité pour générer un champ magnétique intense, et les semiconducteurs, constituant des puissants calculateurs effectuant le traitement du signal.

4. Quelques conclusions et perspectives

Le monde a connu une première révolution quantique, dans la première moitié du XX^e siècle : ce fut l'élaboration des concepts et la mise en œuvre du formalisme mathématique.

Nous vivons la seconde révolution quantique, qui a débuté après la seconde guerre mondiale, et qui a permis de développer une multitude d'applications utiles à chacun de nous dans notre vie quotidienne : la présente conférence vous en a donné quelques exemples.

La troisième révolution quantique est en préparation depuis au moins deux décennies : elle consiste à utiliser les propriétés d'un phénomène typiquement quantique dont je ne vous ai pas parlé, il s'agit de l'intrication. Et ces applications vont probablement concerner au moins trois domaines :

- La téléportation quantique de l'information, dans les ordinateurs et les réseaux de communication,
- L'utilisation des Q-bits, c'est-à-dire des bits d'information quantiques, permettant de découpler les capacités de calcul et de stockage, donc susceptibles de conduire à la réalisation de supercalculateurs d'une puissance inouïe.
- La cryptographie quantique, fondée sur le fait qu'une paire intriquée, une fois interceptée, n'est plus intriquée, ce qui permet de dépister l'interception.

En recherche, les physiciens sont toujours en quête d'une théorie permettant d'unifier la gravitation (relativité générale) et la physique quantique, afin notamment de mieux comprendre le big-bang, et d'expliquer les fluctuations d'intensité et de polarisation du rayonnement cosmologique, qui reflètent l'Univers primordial (les premiers 380 000 ans après le big-bang)

Toute cette partie fera l'objet de ma prochaine conférence... d'ici une quinzaine d'années.

En conclusion, tout comme Monsieur Jourdain sans le savoir faisait de la prose, sans le savoir nous baignons dans un monde quantique :

- d'une part parce que nous sommes constitués d'atomes et de molécules, qui obéissent aux lois de la mécanique quantique,
- d'autre part parce que nous en utilisons chaque jour les lois étranges, dans une multitude d'appareils d'usage courant.

RÉFÉRENCES :

- [1] <https://www.matierevolution.fr/spip.php?article4215>
- [2] Nougier J.P., *Les lois étranges de la mécanique quantique et leur impact sur notre conception du monde physique*, Bull. Acad. Sc. Lett. Montp., vol. **44**, p. 297-314 (2014)
- [3] <https://www.top500.org/list/2018/06/?page=1>
- [4] <https://www.usinenouvelle.com/article/la-course-aux-exaflops.N683904>
- [5] <http://www.industrie-mag.com/article8972.html>
- [6] https://www.lepoint.fr/editos-du-point/jean-guisnel/il-y-a-vingt-ans-jacques-chirac-interrompait-definitivement-les-essais-nucleaires-29-01-2016-2013910_53.php
- [7] http://www-lmj.cea.fr/fr/lmj/docs/Plaquette_LMJ_web.pdf
- [8] <https://www.oca.eu/fr/>
- [9] <http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/laser-distance-terre-lune.xml>
- [10] <https://www.journaldugeek.com/2017/09/28/cable-marea-facebook-microsoft-debit-record-de-160-tbits-entre-amerique-nord-europe/>
- [11] <https://lejournel.cnrs.fr/articles/ces-constantes-qui-donnent-la-mesure>
- [12] <https://journal.hautehorlogerie.org/fr/l'invention-de-l'horloge-atomique-a-cree-quelques-surprises/>
- [13] <https://lejournel.cnrs.fr/articles/mesures-le-grand-renversement>
- [14] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Galileo_\(système_de_positionnement\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Galileo_(système_de_positionnement))
- [15] <https://www.numerama.com/politique/386721-galileo-le-gps-europeen-compte-200-millions-d'utilisateurs-dans-le-monde.html>
- [16] <http://lpc2e.cnrs-orleans.fr/~ddwit/gps/cours-GPS.pdf>
- [17] <http://www.aerofutur.com/pdf/CE/Le%20GPS.pdf>