

JULIEN BOBROFF

BIENVENUE DANS

**LA NOUVELLE
REVOLUTION
QUANTIQUE**



Ordinateur, cryptographie,
Internet, spatial, etc. : pourquoi
le XXI^e siècle sera quantique.

Flammarion

**BIENVENUE DANS
LA NOUVELLE
RÉVOLUTION
QUANTIQUE**

JULIEN BOBROFF

BIENVENUE DANS
**LA NOUVELLE
RÉVOLUTION
QUANTIQUE**

Infographies d'Océane Juvin

Flammarion

Infographies : Océane Juvin avec la typographie *Quantype*,
toutes © Flammarion sauf p. 243 et p. 263 (licence Creative
Commons BY-NC-ND pour un usage non commercial)

© Flammarion, 2022
ISBN : 978-2-0802-7040-5

« Pour moi, l'application la plus importante de l'ordinateur quantique, ce sera de démontrer aux gens qui ont dit que c'était impossible qu'ils avaient tort. Le reste, ce sera juste une cerise sur le gâteau. »

Scott Aaronson, chercheur
en informatique quantique.

PROLOGUE : UNE SECONDE RÉVOLUTION ?

« L'informatique quantique pourrait fournir l'une des solutions les plus innovantes au changement climatique. » Voilà le titre de l'article paru lors du Forum mondial de l'économie en 2019. Son auteur, le charismatique PDG de la start-up PsiQuantum, y décrit un ordinateur quantique capable de résoudre la crise climatique, pas moins, et d'ici dix ans ! Cette étrange machine serait capable d'inventer de nouvelles molécules pour capturer le CO₂, responsable du réchauffement de notre planète.

Sûrement trop optimiste, cette annonce n'a pourtant rien d'isolé. Depuis peu, la quantique occupe la une de l'actualité. Politiques, investisseurs, médias, tous ne jurent que par les algorithmes quantiques. Les entreprises les plus emblématiques, Google, Amazon, Microsoft ou IBM, investissent des centaines de millions de dollars dans des laboratoires dernier cri. Elles débauchent les meilleurs scientifiques du domaine. Les États ne sont pas en reste, d'ailleurs. Chine, États-Unis, France, chaque nation annonce son grand « plan quantique ». Tous ces acteurs le clament haut et fort, une nouvelle révolution quantique est en marche !

Bienvenue dans la nouvelle révolution quantique

À bien y réfléchir, pourtant, la physique quantique est née il y a plus de cent ans déjà. Grâce à ce monument de la science, nous comprenons enfin ce qui constitue la matière et la lumière à petite échelle. Cette discipline a naturellement mené à l'invention de technologies de rupture comme le transistor, le laser ou la LED. Nous lui devons toute l'électronique contemporaine. C'est elle, la véritable révolution quantique. Et elle a eu lieu il y a plus de cinquante ans.

Alors, de quelle révolution parle-t-on au juste ? Pour le comprendre, écoutons John Preskill, l'un des scientifiques les plus respectés du domaine :

« Je pense que nous sommes aujourd'hui au tout début de l'exploration d'une nouvelle frontière de la physique. Pour la première fois dans l'histoire de l'humanité, nous commençons à maîtriser les outils pour construire et contrôler avec précision des états quantiques très complexes et hautement intriqués ¹. »

Après des années de balbutiements, les physiciens parviennent à contrôler les atomes et les photons *un par un*. Non seulement ils savent les repérer et les manipuler à l'envi, mais ils peuvent aussi les « intriquer ». De quoi s'agit-il ? L'intrication est cette étrange propriété qui lie le destin de plusieurs particules, même à distance. Bien exploitée, elle autorise de nouvelles façons de calculer, de mesurer, et même de communiquer. C'est donc la manipulation de particules individuelles et l'intrication qui laissent envisager cette seconde révolution, peut-être aussi marquante que la première. Tous les secteurs

Prologue : une seconde révolution ?

pourraient en bénéficier – l’informatique, la chimie, l’environnement, la biologie, les finances, l’aéronautique, la cryptographie, le big data, l’intelligence artificielle... La liste est sans fin. Rien de surprenant à ce que physiciens, informaticiens et ingénieurs allient leurs efforts pour exploiter ces possibilités inédites.

Le récent rapport de la députée Paula Forteza sur le sujet, suivi d’un ambitieux plan quantique français en 2021, le soulignent : l’enjeu est stratégique. Pour cause, plusieurs pans de l’industrie seraient potentiellement bouleversés par cette révolution. Rendez-vous compte, les ordinateurs quantiques pourraient aider à inventer de nouveaux médicaments, à concevoir des matériaux aux propriétés étonnantes, et même à lutter contre le réchauffement climatique en trouvant comment capturer le CO₂, donc. L’intrication pourrait mener à un nouveau type d’Internet ou, dans le champ de l’imagerie, permettre de faire des photos en 3D, dans le noir, derrière un mur... De quoi rêver !

Dans cet ouvrage, nous découvrirons ensemble ces technologies du futur. Je ne vous enseignerai pas la théorie quantique. Vous n’apprendrez pas à résoudre l’équation de Schrödinger. De très bons livres le proposent déjà. Non, je préfère vous emmener découvrir ce domaine en pleine effervescence *de l’intérieur*. Nous pousserons ensemble la porte des laboratoires, nous rencontrerons les experts qui ont accepté de répondre sans détour à mes questions. Nous plongerons dans les entrailles de fabuleuses machines pour nous approcher au plus près des atomes eux-mêmes. Je vous décrirai les

Bienvenue dans la nouvelle révolution quantique

phénomènes quantiques comme s'ils se déroulaient sous vos yeux. Je vous raconterai les toutes dernières découvertes, les plus fascinantes, les plus inattendues, celles qui servent déjà, celles qui ne verront peut-être jamais le jour et, surtout, celles qui, à mon avis, bouleverseront vraiment notre quotidien demain.

Vous le verrez, les révolutions ne seront pas forcément là où on les attend...

1

VOIR UN ATOME

Où l'on découvre comment apprivoiser
un seul atome.

L' action se situe à la fin des années 1970. Deux équipes de recherche réunissent alors le nec plus ultra de la physique atomique. L'une en Allemagne, l'autre aux États-Unis, elles regroupent une dizaine de physiciens au plus, tous au sommet de leur art. Ce sont les chasseurs d'atome.

En Allemagne, Peter Toschek dirige la manœuvre. À bientôt cinquante ans, digne héritier de Wolfgang Paul, son directeur de thèse et futur prix Nobel, ce chercheur travaille à domestiquer des jets d'atomes.

Aux États-Unis, Hans Dehmelt mène la danse. Lui aussi est issu de la prestigieuse école allemande. Après avoir émigré, il a obtenu un poste à l'université de Washington. Il y a fait ses preuves en accomplissant une prouesse inouïe : capturer un électron unique, une première internationale. Un brillant chercheur post-doctorant, David Wineland, vient de le rejoindre.

Les deux clans sont prêts à relever le défi majeur du moment, capturer un atome. Que le match Allemagne-États-Unis commence !

Bienvenue dans la nouvelle révolution quantique

Piéger l'insaisissable

L'atome est un animal pour le moins furtif. Il ne mesure qu'un à deux dixièmes de nanomètres, un milliard de fois plus petit que le livre que vous tenez dans les mains. Un microscope optique n'a aucune chance de le repérer. Et quand bien même vous disposeriez d'une loupe magique qui grossirait un milliard de fois, ce serait peine perdue, car l'atome se déplace trop vite. Dans l'air, à nos températures, n'importe quel atome bouge sans cesse de façon erratique, tel un chien fou, à plus de 300 mètres par seconde, soit 1 000 kilomètres par heure !

Un des pionniers du domaine, Erwin Schrödinger – oui, celui du fameux chat et de l'équation fondamentale de la quantique qui porte son nom – avait mis en garde :

« Nous ne faisons jamais de mesure sur un seul électron ou un atome. Parfois, dans des expériences de pensée, nous supposons que nous le faisons, mais cela mène chaque fois à des conséquences ridicules... »

Pour le Nobel autrichien, il n'était tout simplement pas envisageable de manipuler un seul atome.

Mais c'est une vieille habitude de chercheur : dès lors qu'on vous prédit l'échec assuré, cela redouble votre motivation pour tenter l'expérience et montrer aux pessimistes qu'ils avaient tort. D'ailleurs, sur le papier, la tactique à déployer semble simple. Il faut piéger l'atome dans une petite zone, puis l'immobiliser, pour enfin le photographier. Comment s'y prendre en pratique ?

La première étape, peut-être la plus facile, exploite les lois de l'électricité. En premier lieu, il convient de

Voir un atome

bombarder l'atome avec d'autres particules. Cela va arracher un de ses électrons et rompre sa neutralité électrique. Désormais électriquement plus positif que négatif, il s'est métamorphosé en un « ion ». Dès lors, il devient sensible au moindre champ électrique. Malheureusement, un simple champ ne le bloque que dans une direction, si bien qu'il peut s'enfuir par les côtés.

C'est Wolfgang Paul qui trouve la solution. C'était justement le directeur de thèse de Toschek. Le monde de la physique atomique est un petit cercle où la passion pour les atomes se transmet de génération en génération. Le physicien invente en 1953 le guet-apens parfait, le bien nommé « piège de Paul ».

Il s'agit d'un simple anneau métallique placé entre deux bouchons, également métalliques. Toute l'astuce consiste à envoyer dans cet assemblage des courants électriques alternatifs, tantôt positifs, tantôt négatifs. Ces courants créent des champs qui varient sans cesse, tantôt vers la gauche, tantôt vers la droite. Disposé au cœur du montage, l'ion subit des forces oscillantes dans toutes les directions qui l'empêchent de s'échapper. Il n'est pas figé pour autant, mais, du moins, il lui est impossible de ressortir du redoutable piège : le tour est joué ¹ !

Sauts de chamois

Deuxième étape, il importe d'immobiliser la bête, qui paraît pour l'instant totalement affolée. Les documentaristes animaliers le savent bien : si l'on cherche à observer

Bienvenue dans la nouvelle révolution quantique

une espèce rare et fuyante, tel un léopard des neiges, il est nécessaire de connaître ses lieux de vie, ses habitudes alimentaires, sa réaction à l'odeur humaine... Les physiciens adoptent la même stratégie. Pour dompter un atome, ils commencent par comprendre ses habitus et les lois qui le gouvernent.

Voici ce que l'on en sait. L'atome, c'est un noyau et des électrons. Au milieu, le noyau mesure un milliardième de milliardième de mètre au plus, autant dire un point à l'échelle de l'ensemble. Pourtant, il contient presque toute la masse à lui seul. Autour de lui circulent des électrons ultralégers. Attention, ne les imaginez pas telles des planètes autour d'un Soleil, comme on a parfois l'habitude de les dessiner. Chaque électron forme plutôt une sorte de nuage flou aux noms variés, orbitale, fonction d'onde... Nous y reviendrons. Pour l'heure, acceptons juste que tous les électrons se comportent comme des nuages, imbriqués les uns dans les autres.

Il est temps de faire entrer en scène la propriété sans doute la plus importante de ces particules, celle sur laquelle va reposer l'essentiel des chapitres à venir, j'ai nommé la « quantification » : l'énergie de chaque électron dans l'atome est quantifiée. Cela signifie que l'électron ne peut avoir que certaines énergies aux valeurs bien précises, pas moyen d'y échapper.

Pour toucher du doigt cet intrigant phénomène, imaginez que l'électron doive gravir une échelle. Il se place naturellement au barreau le plus bas : c'est le niveau fondamental, qui correspond à la situation la plus reposante pour l'électron. En revanche, pour peu qu'on

Voir un atome

l'excite, qu'on l'illumine ou qu'on le chauffe, alors l'électron monte sur l'un des barreaux suivants. Mais cette ascension se déroule brutalement – pas le temps de voir l'électron sauter qu'il est déjà arrivé. Les physiciens l'appellent d'ailleurs « saut quantique ». Au cours de ce changement brutal, l'électron semble comme téléporté d'un barreau vers le suivant. Même chose lors de sa redescente, mais en sens inverse : là encore, l'électron obéit à cette étrange chorégraphie. Il se téléporte de barreau en barreau, tel un chamois qui bondirait d'un rocher à l'autre. Une propriété clé, puisque, justement, la plupart des technologies quantiques reposent sur l'art de contrôler ces sauts, de les provoquer ou, au contraire, de les empêcher.

Dans le cas présent, ces niveaux d'énergie vont permettre aux chercheurs d'immobiliser l'atome dans son piège.

Des lasers pour refroidir

C'est en 1975 que le duo Dehmelt-Wineland formule pour la première fois l'idée absurde de ralentir les ions avec des lasers². Absurde, car un laser devrait plutôt chauffer les atomes, les exciter, les faire bouger. Mais, pour les deux Américains, un laser astucieusement employé pourrait bien devenir le meilleur des ralentisseurs.

Les physiciens imaginent un dispositif digne d'un film de science-fiction à forte adrénaline. L'atome y joue le rôle du prisonnier en fuite. Il est rapide, véloce, invisible. Les

Bienvenue dans la nouvelle révolution quantique

forces de l'ordre sont à ses trousses. L'atome se retrouve bientôt entouré de quatre types en uniforme équipés de pistolets laser. Musique haletante, caméra à l'épaule, immersion totale. L'atome va-t-il leur échapper ?

Soudain, les quatre lasers fusent. L'atome se trouve pris sous le feu de leurs rayons. Mais les faisceaux de lumière rouge semblent lui passer à travers... Logique, seul un laser parfaitement ajusté aux niveaux quantiques de l'atome pourrait l'affecter, mais les policiers n'ont visiblement pas réglé leur arme à la bonne couleur ! Du moins, c'est ce que pense le spectateur.

Et voilà que l'atome s'élance vers la droite pour échapper aux policiers. Aussitôt, il ressent un violent impact qui le fait reculer, comme si quelqu'un l'avait repoussé. Surpris, il tente sa chance vers la gauche. Bam ! Même choc invisible, même coup de frein brutal. Il réitère dans toutes les directions, rien n'y fait, il est coincé ! « Ah, ah ! » s'exclame, sardonique, l'un des policiers, « tu ne t'attendais pas à un refroidissement Doppler, pas vrai ? »

Décodons la scène. L'atome n'est sensible qu'à une seule couleur de laser bien spécifique. En effet, la lumière du laser est composée de particules quantiques elles aussi, les photons, toutes de même couleur et de même énergie. Quand l'un de ces photons rencontre l'atome, il n'a d'effet que s'il a exactement la bonne couleur, par exemple du bleu. Dans ce cas seulement, l'énergie du photon permet à l'atome de sauter vers son niveau excité, de gravir un barreau sur l'échelle. Voilà pourquoi rien ne se passe au début du film, quand les lasers sont bien rouges.

Voir un atome

La situation change radicalement dès que l'atome se déplace vers un laser. Dès lors, il ne le voit plus rouge, mais plutôt bleu. Pour comprendre pourquoi, il faut se rappeler que la lumière se comporte comme une onde, une série de vagues régulières et oscillantes. L'écart entre deux vagues, la « longueur d'onde », gouverne la couleur. Le bleu correspond à des oscillations bien serrées et à une longueur d'onde courte, tandis que le rouge traduit des oscillations presque deux fois plus espacées. Ainsi, quand l'atome va à la rencontre du laser, il reçoit de plein fouet les vagues successives, qui l'impactent à un rythme plus rapide. Bref, l'atome voit bleu un laser pourtant tout ce qu'il y a de plus rouge. Il s'agit d'une manifestation de l'effet Doppler, un phénomène que nos oreilles connaissent bien quand une ambulance passe dans la rue. Quand elle s'approche, le son de sa sirène est franchement aigu. Qu'elle s'éloigne et il deviendra grave.

Le destin de l'atome est désormais scellé : il avance vers le laser, voit soudain des photons bleus, qui le font sauter au niveau supérieur. Ces mêmes photons le repoussent alors en arrière, un simple effet mécanique comme le recul qu'on subit en tirant à la carabine. Quel que soit le laser rencontré, le scénario est le même³. Voilà comment l'effet Doppler bien utilisé permet de ralentir les atomes. Pour le physicien, ce ralentissement est synonyme de refroidissement, car mouvement et température ne font qu'un. Immobiliser l'atome, c'est le refroidir.

En science, une idée seule suffit rarement à convaincre les collègues, encore faut-il la mettre en œuvre. Dehmelt

Bienvenue dans la nouvelle révolution quantique

et Wineland semblent les mieux placés pour passer à la phase de test et prendre de vitesse les Allemands réunis autour de Toschek. Mais, dans le monde de la recherche, compétitions et collaborations s'alternent souvent au gré des voyages et des carrières. À ce moment précis de l'histoire, le jeune Wineland obtient un poste dans un autre laboratoire. Son ancien chef, Dehmelt, part alors passer six mois à Heidelberg chez... Toschek, son principal concurrent, pour travailler ensemble ! Un peu comme si, au milieu d'un match de foot, les équipes décidaient de se recomposer.

Nouvelle situation sur le ring : à ma gauche, les « vieux de la vieille », Dehmelt et Toschek, réunis pour six mois, et à ma droite, le jeune Wineland dans son nouveau laboratoire. Tous travaillent d'arrache-pied. Ils se savent en compétition. Wineland choisit de piéger des atomes de magnésium, Toschek et Dehmelt préfèrent du baryum. Début 1978, les deux équipes réalisent enfin un refroidissement Doppler. Chacune soumet aussitôt ses résultats à la prestigieuse *Physical Review Letters*, sans savoir que l'autre y est aussi parvenue. Les deux manuscrits arrivent chez l'éditeur à un seul jour d'écart, égalité quasi parfaite.

L'atome était piégé, le voilà maintenant immobilisé. Reste à le photographier.

Couleur fluo

Le stratagème, pour visualiser un atome, consiste à le faire briller. Pour cela, la physique quantique fournit un

Voir un atome

outil de choix, la fluorescence. Bien connu dans le monde animal ou végétal, ce phénomène trouve son origine dans certaines molécules, qui semblent briller spontanément. En réalité, elles ne font que *transformer* la lumière. Lorsqu'un atome fluorescent est éclairé avec la bonne couleur, cela l'excite, et ses électrons sautent vers un niveau supérieur, c'est entendu. Mais que se passe-t-il ensuite ? En général, les électrons reviennent dès que possible à leur état initial, au repos, en restituant le surplus d'énergie qu'ils avaient reçu sous forme de lumière. On leur a donné un photon, ils en rendent un autre. Fin de l'histoire, rien de bien neuf sous le soleil.

En revanche, si l'atome a préalablement cédé un peu d'énergie par un autre mécanisme, alors le photon qu'il émet n'est plus aussi énergétique que celui qu'il avait reçu : simple question de bilan. Or qui dit énergie différente dit couleur différente. L'atome a été éclairé avec des photons bleus, le voilà qui en rayonne des rouges. En faisant fluorescer l'atome, on le transforme ainsi en une ampoule minuscule, certes, mais brillante et lumineuse. La situation idéale pour le prendre ensuite en photo !

Ouf, l'expérience finale peut enfin être tentée. C'est l'équipe de Toschek qui, la première, s'y aventure en 1979. Les chercheurs partent d'un gaz d'ions de baryum, la substance parfaite car elle fluoresce dans le bleu et sera facile à repérer. Ils font pénétrer les ions dans un petit piège de Paul de moins de 1 centimètre de côté, entouré de rayons laser judicieusement réglés pour assurer le freinage. Un simple microscope observe l'intérieur du piège, auquel est fixé un appareil photo.

Bienvenue dans la nouvelle révolution quantique

Vous êtes prêt ? Moteur. Un des physiciens ouvre lentement la vanne. Un premier ion arrive à grande vitesse. Dès qu'il pénètre dans le piège, il voit sa trajectoire modifiée et tourbillonne sur place. Sous l'effet des lasers, le voilà qui se calme petit à petit, dompté par l'effet Doppler. Touche finale, un dernier laser le fait fluorescer : il se met à briller sous la lentille du microscope. Une modeste tache bleue apparaît dans le viseur. Clic-clac. La photo est prise, en noir et blanc. Elle deviendra la figure n° 3 d'un célèbre article publié en 1980 par Toschek et ses collègues. On y distingue, au milieu du piège, un tout petit point lumineux : un ion de baryum, un seul et unique ion. Ironie de l'histoire, dans la version de l'article désormais accessible en ligne, ce point blanc manque, probablement à cause d'un mauvais scan de la photo d'origine. Sur cette figure 3, là où se trouvait le baryum, il n'y a plus que du noir... La première image d'un atome a disparu d'Internet et ne peut vraiment être vue qu'en bibliothèque sur la version papier.

Wolfgang Paul, Hans Dehmelt, David Wineland, les trois chercheurs obtiendront un prix Nobel pour leurs travaux. Peter Toschek n'aura pas cet honneur. Au diable les prix prestigieux, Toschek, véritable Armstrong de la quantique, pourra se vanter d'avoir été le premier homme à avoir observé, en direct, un atome.

Vous avez dit technologies quantiques ?

Même si la prouesse impressionne, force est de constater qu'elle déçoit aussi un peu. Je vous avais promis des technologies quantiques ultramodernes, des applications formidables, des inventions, des innovations... Et nous voilà en 1979 à admirer la photographie d'un ion, en noir et blanc qui plus est, dans des laboratoires de physique fondamentale ! Et ce cliché blafard ne nous a rien appris qu'on ne savait déjà du côté des fondements de la quantique...

Pourquoi lui consacrer tout un chapitre, et même le premier du livre ? En fait, même si les chercheurs n'étaient motivés que par des questions purement fondamentales, ils ont en cours de route développé un véritable arsenal d'astuces quantiques pour apprivoiser les atomes individuels. Forts de cette toute nouvelle boîte à outils quantique, ils se sont alors naturellement demandé ce qu'ils pourraient fabriquer d'autre avec.

C'est ainsi que, dans la foulée de ces expériences fondatrices, les mêmes laboratoires inventèrent les horloges optiques, les gravimètres quantiques, les capteurs inertiels atomiques... Puis, au début des années 2000, ils commencèrent à imaginer des ordinateurs quantiques, toujours avec les mêmes ions coincés dans leurs pièges de Paul. Vingt ans plus tard, à l'heure où j'écris ce livre, les ions piégés sont devenus des stars incontournables de l'informatique quantique.

Voilà pourquoi j'ai voulu vous raconter cette traque à l'ion furtif. Elle n'est pas juste admirable d'inventivité,

Bienvenue dans la nouvelle révolution quantique

elle constitue surtout la toute première brique de ce qui va conduire à la nouvelle révolution quantique. Notez l'échelle de temps, une vingtaine d'années pour mettre au point les méthodes de base, une vingtaine encore pour parvenir à des applications. Patience, camarades, la révolution est en marche... mais elle prend du temps !

2

QUELLE HEURE EST-IL ?

En faisant interférer des atomes,
on obtient les horloges les plus précises au monde,
et bien plus encore.

Rien ne va plus au prestigieux concours chronométrique de l'Observatoire de Neuchâtel ! En cette année 1967, pour la toute première fois, des montres à quartz participent à la compétition dans la catégorie « montre-bracelet ». Dix fois plus précis que les meilleurs modèles mécaniques, les prototypes suisses « Béta » rafflent tous les premiers prix. Un seul participant non helvète, le japonais Seiko, tente de rivaliser, mais il ne parvient qu'à la dixième place. Pourtant, deux ans plus tard, le même Seiko commercialise la toute première montre à quartz, la légendaire « Astron ». À peine quelques années plus tard, le quartz japonais a envahi le marché des montres, avec plus de trois quarts des ventes. Les Suisses, fiers de leur horlogerie mécanique de luxe, n'ont pas vu venir cette révolution technologique.

Ils auraient pourtant dû le savoir, l'art de mesurer le temps est avant tout affaire de technologie et de physique. Depuis le Moyen Âge, chaque époque a vu ses meilleurs scientifiques et ses plus brillants ingénieurs s'affronter dans cette course à la précision. Il ne s'agit

Bienvenue dans la nouvelle révolution quantique

pas d'une simple quête aux trophées. Déterminer l'heure plus précisément que ses concurrents confère un avantage stratégique crucial dans de nombreux domaines, de la navigation maritime à la conquête de l'espace. Et c'est du côté de la quantique que cette course se joue aujourd'hui.

Donner l'heure à un extraterrestre

La mesure du temps repose toujours sur l'observation d'un mécanisme périodique, quel qu'il soit, pour peu qu'il se répète le plus régulièrement possible. Dans une horloge comtoise, le long pendule en bois effectue un balancement toutes les secondes. Ces allers-retours réguliers permettent à la mécanique dissimulée derrière le cadran de faire avancer l'aiguille seconde après seconde. Pour concevoir l'horloge parfaite, il importe que la durée de l'aller-retour du balancier soit la plus stable et précise possible. Cette durée-là, la « période », doit être insensible aux perturbations extérieures, à l'humidité, à la température, aux chocs. Imaginez que votre montre se mette à retarder chaque fois qu'il pleut ou que vous faites un jogging... Enfin, deux montres exploitant le même phénomène périodique doivent impérativement donner la même heure, aux quatre coins du monde ou même dans l'espace. En somme, on attend d'elles qu'elles produisent un temps *universel*.

Pour juger du caractère *universel* d'un phénomène, demandez-vous si vous pourriez expliquer comment le reproduire à un extraterrestre à l'autre bout de la galaxie.

Quelle heure est-il ?

Seriez-vous capable de communiquer à distance la recette pour aider un alien à construire une montre qui mesurerait la même heure que sur Terre ? C'est moins facile qu'il n'y paraît. Pour une horloge comtoise par exemple, vous auriez bien du mal à expliquer aux habitants d'Alpha du Centaure quel bois utiliser, quel métal, quel ressort... Cette question un peu absurde, la NASA la posa au physicien Carl Sagan au début des années 1970. La sonde *Pioneer 10* allait être envoyée dans l'espace pour un voyage au-delà de notre Système solaire. Il avait été décidé d'y accrocher un message gravé sur une plaque, au cas où des extraterrestres l'intercepteraient. Sagan dut justement trouver une façon universelle d'y indiquer des durées¹. Il choisit de dessiner pour cela un simple atome d'hydrogène dans son état fondamental et dans son état excité.

Par quel miracle un atome permettrait-il de définir un temps universel et surtout de fabriquer une horloge ? Nous l'avons déjà évoqué, tout atome a des niveaux quantiques, comme les barreaux d'une échelle. Pour l'exciter et le faire passer d'un niveau au suivant, il faut lui envoyer un photon avec la bonne énergie, donc une lumière avec la bonne longueur d'onde. Cette lumière n'est rien d'autre qu'une onde électromagnétique qui oscille régulièrement et dont la période est directement reliée à l'énergie des photons². Ce battement impalpable de la lumière, le voilà, le phénomène périodique qui remplacera idéalement le balancier en bois de l'horloge. L'atome sert donc ici de diapason pour régler avec une précision diabolique la période de l'onde qui l'éclaire.

Bienvenue dans la nouvelle révolution quantique

Un atome d'hydrogène, par exemple, réagit à une onde électromagnétique dont les oscillations se succèdent chaque 0,704 nanoseconde très précisément. En prime, cette valeur est *universelle*. Tous les atomes d'hydrogène sur Terre, sur Alpha du Centaure et partout dans l'espace ne réagiront qu'à cette période-là. Carl Sagan savait donc qu'en dessinant un hydrogène et ses deux niveaux, il définissait une unité de temps commune à tout l'Univers.

L'idée n'est pas nouvelle. Dès 1879, Lord Kelvin avait imaginé que la vibration d'un atome de sodium pourrait servir de standard pour la mesure du temps. Bien sûr, il était loin du compte, mais il avait la bonne intuition. Et c'est grâce à l'avènement de la physique quantique au début du XX^e siècle qu'on comprit comment s'y prendre pour concevoir concrètement cette horloge atomique. En voici le détail.

Recette pour fabriquer une horloge atomique en quatre étapes

1. Choisissez une famille d'atomes, disons du césium, un des atomes les plus populaires chez les spécialistes. Préparez-le sous forme gazeuse.
2. Calmez les atomes avec des lasers appropriés.
2. Envoyez-leur une onde électromagnétique.
3. Observez si elle les excite. Ce n'est pas le cas ? Modifiez la période de l'onde, et recommencez jusqu'à observer un effet.
4. Ça y est, les césiums ont bien été excités ? Appelez alors le Bureau international des poids et mesures, le BIPM, pour vérifier quelle est leur fréquence officielle. « Le césium ? Attendez

Quelle heure est-il ?

une seconde... oui, la fréquence pour le césium, c'est 9 192 631 770 Hz. » Vous rétorquez : « Entendu, et la période ? » Réponse du standardiste : « Ah, vous n'êtes pas physicien, je vois... Il vous suffit de prendre l'inverse. Attendez, je calcule ça pour vous... (bruit de clavier)... Vous notez ? Ça fait 0,10878278 nanoseconde. »

Le tour est joué. Vous détenez entre vos mains une onde oscillante avec une période parfaitement définie de 0,10878278 milliardième de seconde. Une sorte de pendule ultrarapide, hyperprécis et, qui plus est, parfaitement universel. Cette recette est d'ailleurs justement celle retenue par le BIPM au niveau international pour définir la seconde, l'unité de temps élémentaire à la base de toute mesure du temps.

Une fontaine à atomes

La recette semble simple, mais la conception d'un tel dispositif demande les savoir-faire les plus avancés dans le champ des lasers et des atomes. Il a fallu plus de cinquante ans de recherches de pointe pour parvenir à fabriquer des horloges atomiques au césium suffisamment précises. Près de dix physiciens ont été récompensés d'un prix Nobel pour ces travaux.

De nos jours, ces horloges gouvernent le temps partout sur Terre. On l'ignore souvent, mais nos montres, nos smartphones, nos ordinateurs, tous se comparent à intervalle régulier à une référence commune, l'heure dite

Bienvenue dans la nouvelle révolution quantique

« UTC », un temps universel coordonné. Elle est calculée par le BPIM, encore lui, qui récupère en direct le temps mesuré par une douzaine d'horloges atomiques à travers la planète. L'heure est ainsi déterminée avec seize chiffres après la virgule, une précision remarquable.

Il se trouve que ces douze horloges fonctionnent toutes à partir de fontaines atomiques. Christophe Salomon, l'un des grands spécialistes du domaine, m'a raconté la toute première fontaine qu'il avait conçue avec ses collègues Clairon, Guellati et Phillips au début des années 1990. L'expérience était d'une redoutable complexité. Trois tables optiques avaient été nécessaires, l'une pour faire fonctionner les lasers, l'autre pour mettre en forme les rayons lumineux, la troisième pour refroidir et projeter les atomes dans la fontaine. L'un des lasers devait être rechargé tous les deux jours, l'autre ne cessait de tomber en panne, une véritable usine à gaz. Un montage infernal, qui leur permit cependant de démontrer pour la première fois le formidable potentiel du dispositif.

Allons visiter une version moderne de ce petit bijou au laboratoire SYRTE, de l'Observatoire de Paris, où se trouvent trois des douze horloges qui déterminent le temps universel. L'horloge à fontaine n'a rien d'une montre habituelle, dans sa version mécanique ou électronique à quartz. Se dressant sur 2 à 3 mètres de haut, elle évoque une grosse cheminée métallique, tandis que les nombreux câbles et pompes en tout genre qui l'alimentent vous rappellent qu'on est dans un laboratoire de physique. Elle utilise au départ du gaz de césium. Six rayons laser placés autour servent à ralentir chaque