

physique

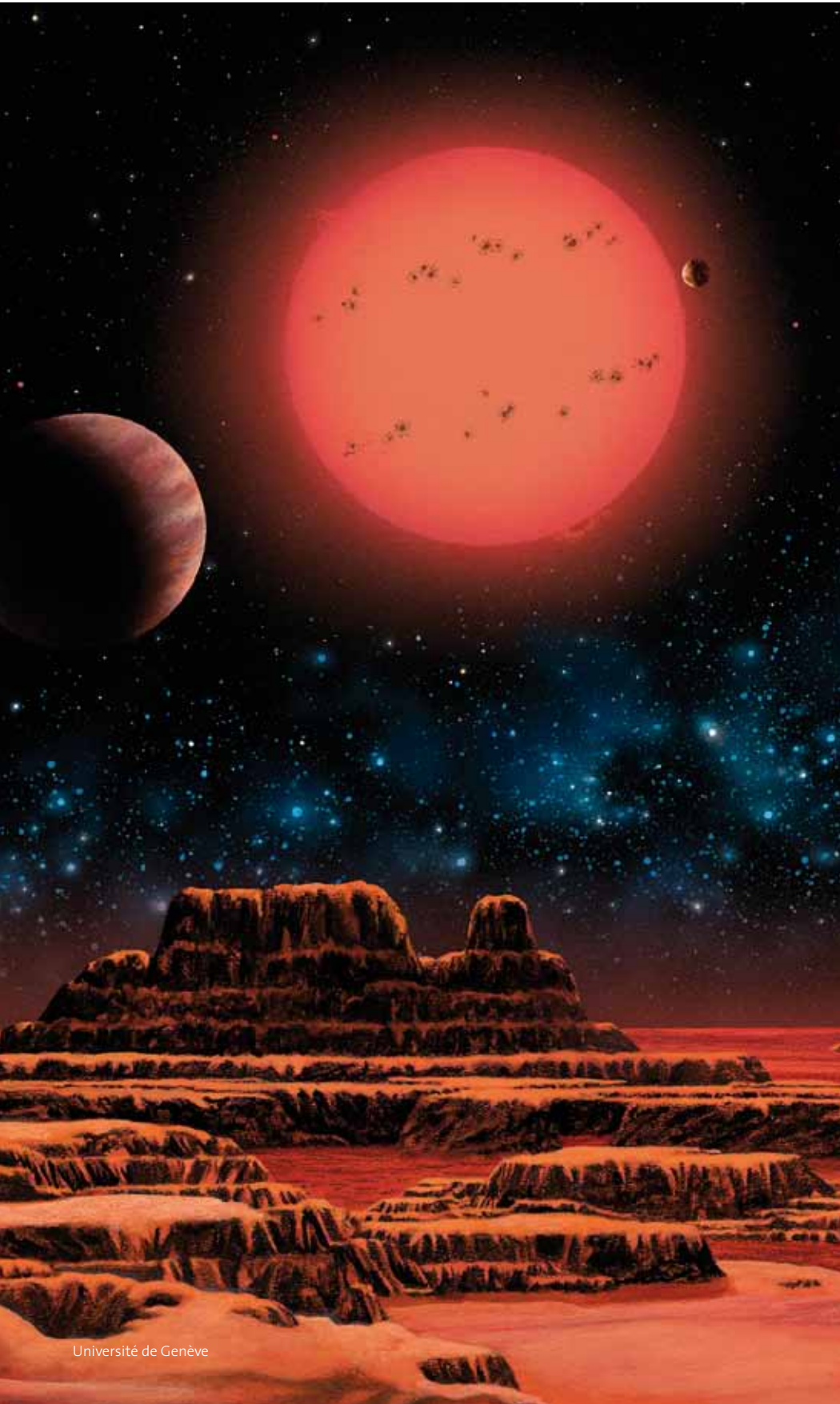
AUX CONFINS DES MO

LYNETTE COOK



NDES

Gliese 876, une étoile située à 15 années-lumière, dans la constellation du Verseau. Elle possède au moins quatre planètes, dont la plus petite ne pèse que huit fois la masse de la Terre.



La chasse aux planètes extrasolaires a pris son envol dès la découverte de la première d'entre elles en 1995. Cette quête se confond avec le parcours de l'astrophysicien Michel Mayor

La cryptographie quantique est passée du stade de rêve à celui de projet réalisable grâce à un article paru en 1991. Le physicien Nicolas Gisin a pris la balle au bond et est devenu un des plus grands spécialistes de communication quantique

CHASSEUR DE PLANÈTES

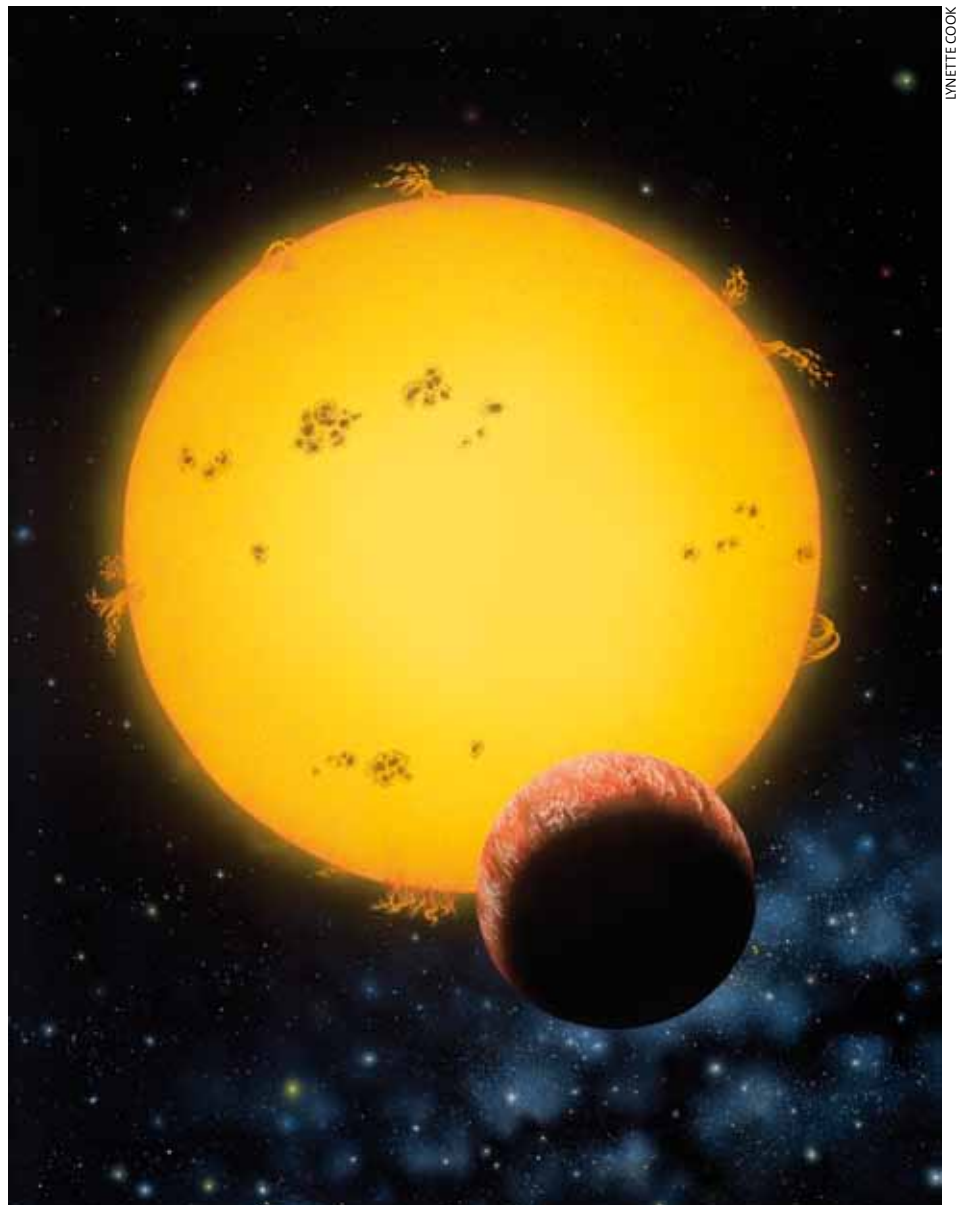
En 1990, l'astrophysicien genevois Michel Mayor se prépare activement pour la chasse à la première planète extrasolaire. Il épingle son premier trophée en 1995 et, depuis, a contribué à la découverte de plus d'une centaine d'autres

Juin 1990, Val Cenis en Savoie. Durant trois jours, une centaine de scientifiques font le point sur les connaissances accumulées jusque-là dans une discipline récente: l'astrobiologie. Les savants rassemblés au cours du troisième symposium international autour de ce thème sont poussés par la même passion: l'origine de la vie et, pour beaucoup, la recherche de la vie extraterrestre. Plus de la moitié des interventions concerne d'ailleurs le programme SETI (*Search for Extra-Terrestrial Intelligence*) dont les membres scrutent le ciel depuis les années 1960 dans l'espoir de détecter des signaux venant d'une hypothétique civilisation qui se serait développée «ailleurs».

Egalement présents, deux astrophysiciens de l'Observatoire astronomique de l'Université de Genève (Faculté des sciences) ont, quant à eux, abordé le problème par l'autre bout. Ce que cherchent le professeur Michel Mayor et son doctorant Antoine Duquennoy, ce sont des astres qui ressemblent au soleil et qui seraient à même d'héberger un éventuel système planétaire, quelle que soit sa forme. Leur exposé, *Combien d'étoiles solitaires parmi les étoiles de type solaire?* n'a probablement pas déchaîné l'enthousiasme. Les participants ne pouvaient pas savoir que Michel Mayor allait devenir quelques années plus tard l'auteur de la découverte de la première planète extrasolaire. Et inaugurer ainsi un gigantesque nouveau champ de recherche.

«S'AMUSER COMME DES FOUS»

Michel Mayor ne songe pourtant pas à pister des planètes lorsque, jeune astrophysicien dans les années 1970, il se spécialise dans la mesure des vitesses des étoiles. Mais il y contribue déjà. Il participe en effet à la construction d'un spectrographe, baptisé Coravel, qui est installé sur le télescope de l'Observatoire de Haute-Provence en 1977. Cet instrument est capable de mesurer par effet Doppler (c'est-à-dire par le même principe que les radars de



LYNETTE COOK

La première planète extrasolaire découverte est 51 Peg b, située à 48 années-lumière dans la constellation de Pégase. Elle accomplit une orbite complète en 4,2 jours et est vingt fois plus proche de son étoile que ne l'est la Terre du Soleil.

la sécurité routière) la vitesse de rapprochement et d'éloignement des étoiles du ciel par rapport à l'observateur sur Terre. Le plus petit mouvement perceptible est alors de l'ordre de 300 mètres par seconde; l'appareil est le plus efficace de son temps, et de loin.

«Cet engin avait un tel avantage sur ses concurrents et était si facile et agréable d'usage qu'il nous a ouvert d'un coup un nombre considérable de champs de recherche (composition des étoiles, structure des amas globulaires et de la galaxie, etc.), précise Michel Mayor. Cela nous a donné un peu le vertige, mais nous nous sommes amusés comme des fous.»

VOISINAGE SOLAIRE

Enthousiastes, les astronomes s'attaquent donc à plusieurs problèmes en même temps. Parmi eux, il en est un qui consiste à détecter et à étudier méthodiquement les étoiles doubles (deux étoiles tournant l'une autour de l'autre) se situant dans le voisinage solaire (moins de 500 années-lumière de distance) et dont un des membres au moins est une étoile de type solaire. Ces systèmes binaires peuvent renseigner sur les mécanismes de la formation stellaire, un domaine encore fort mal compris. Un grand nombre de ces étoiles doubles sont déjà connues, mais les informations concernant leur masse, période et la forme de leurs orbites sont souvent lacunaires.

Michel Mayor et Antoine Duquennoy choisissent quelques centaines d'étoiles parmi les plus proches et commencent à mesurer leur vitesse radiale à l'aide de Coravel. Cette grandeur, si elle varie de manière périodique, peut en effet trahir la présence d'un second astre, souvent invisible au télescope. Ce travail de fond prendra près de quinze ans.

Au fur et à mesure que les deux chercheurs avancent dans leurs observations, ils remarquent cependant un fait intéressant: la taille des compagnons stellaires qu'ils découvrent varie beaucoup. Si la majorité d'entre eux possède une masse correspondant en moyenne à la moitié de celle du Soleil, il en apparaît des plus légères, jusqu'à moins d'un dixième de la masse solaire. On entre alors dans le domaine des naines brunes. Ces dernières sont des astres formés comme les étoiles ordinaires, mais qui ne sont pas assez massives pour amorcer des réactions nucléaires en leur cœur.

«En 1989, nous franchissons un seuil, raconte Michel Mayor. Toujours avec Coravel, nous détectons un objet de onze fois la masse de Jupiter autour de l'étoile HD114762. Cela devient intéressant. On se rapproche diablement de la taille des planètes.»

«Nous détectons alors un objet de onze fois la masse de Jupiter. Cela devient intéressant. On se rapproche diablement de la taille des planètes»

Les auteurs de la découverte, réalisée en collaboration avec une équipe de l'Université de Harvard aux États-Unis, discutent d'ailleurs intensément sur la vraie nature de ce compagnon stellaire dont on ne connaît la présence que par le biais des oscillations qu'il imprime à son étoile. Finalement, ils optent pour le qualificatif de «naine brune de petite masse». Même si le mot «planète» n'est pas lâché, l'article, publié dans la revue *Nature* du 4 mai 1989, fait du bruit dans la communauté scientifique et relance l'intérêt pour la chasse aux planètes extrasolaires.

UN NOUVEAU MONDE

Michel Mayor est conquis, lui aussi. C'est pourquoi il se rend au troisième symposium international d'astrobiologie qui se tient à Val Cenis l'année suivante. «C'est une date importante dans ma carrière, se souvient l'astrophysicien genevois. C'était la première fois que j'entrais en contact avec le monde des chercheurs de planètes. J'y ai rencontré de nombreux théoriciens sur l'origine de la vie, des biologistes, des astronomes bien sûr, mais peu d'observateurs du ciel comme nous. Ce symposium a été pour moi un signal m'informant que j'étais entré dans un autre domaine de l'astronomie, différent de ceux dont j'avais l'habitude jusque-là.»

Cependant, pour étoffer son tableau de chasse avec des trophées plus prestigieux qu'une petite naine brune, il lui faut un nouvel instrument, plus précis que Coravel. C'est alors que, comme une coïncidence, Philippe Véron, le directeur de l'Observatoire de Haute-Provence (OHP) lance la construction d'un nouveau spectrographe. Son objectif n'est pas la détection de planètes, mais la réalisa-

tion d'observations durant les nuits avec la Lune. L'idée est de construire une copie de Coravel améliorée et mise à jour du point de vue technologique (en intégrant notamment des caméras CCD et des fibres optiques). Les constructeurs de l'ancien spectrographe, dont fait partie Michel Mayor, sont invités à concevoir le nouvel instrument.

L'occasion est trop belle. Le chercheur genevois propose de construire deux instruments au lieu d'un seul, histoire de pouvoir observer aussi le ciel de l'hémisphère Sud. L'Université de Genève participe à l'effort, surtout dans le développement des logiciels d'analyse du signal. C'est à ce moment que Didier Queloz, alors doctorant, entre dans le projet. C'est ainsi que naissent Elodie en 1993, installée sur le télescope de 2 mètres de diamètre de l'OHP, puis Coralie en 1995, montée sur le télescope suisse Léonard Euler de 1,2 mètre à La Silla au Chili.

«Notre participation à la construction d'Elodie nous est rémunérée sous la forme d'une semaine d'observation à l'OHP tous les deux mois, explique Michel Mayor. Très vite, nous nous rendons compte qu'Elodie est vingt fois plus précise que Coravel.»

UNE ÉTOILE INTÉRESSANTE

La campagne de mesures commence en avril 1994. Les chercheurs genevois ne font pas mystère de leurs ambitions puisque dans leur demande officielle de temps d'observation adressée à l'OHP, les astrophysiciens genevois stipulent qu'ils tenteront de déterminer les masses des objets entrant dans la composition des systèmes doubles «jusque dans le domaine des naines brunes et des planètes géantes».

Elodie, l'un des meilleurs spectrographes du moment, n'est pas le seul atout des chercheurs. Ils disposent également d'un logiciel d'analyse qu'ils ont développé eux-mêmes. Ce dernier leur fournit immédiatement la vitesse de l'étoile à partir de la mesure brute, une opération qui, normalement, dure des jours ou des semaines selon la quantité de données à traiter. Les astrophysiciens peuvent donc réagir tout de suite si une étoile révèle un comportement intéressant, contrairement aux équipes concurrentes.

Autre avantage, mais cela ils ne le savent pas encore: leur champ de recherche compte la détection d'oscillations d'étoiles dont la période dure plusieurs années, tout en étant ouvert à des périodes beaucoup plus courtes, de l'ordre de quelques jours. Cela vient du fait que leur programme inclut la détection de ►

naines brunes dont ils ignorent tout et dont la période de rotation autour de l'étoile peut, *a priori*, prendre n'importe quelle valeur.

Fin prêts, les chercheurs ont dans leur collimateur une première sélection de 142 étoiles de type solaire. Après seulement quelques mois, l'une d'entre elles, *51 Pegasi*, située dans la constellation de Pégase, fait apparaître les frémissements d'une oscillation périodique. Les premières estimations tablent sur la présence autour d'elle d'un objet de la moitié de la masse de Jupiter accomplissant une orbite complète en quelques jours seulement. Une valeur si basse est une surprise, mais ces calculs ne sont basés que sur quelques points placés sur un graphique.

Deux mois après avoir réalisé les premières mesures sur *51 Peg*, les astrophysiciens disposent d'une nouvelle semaine d'observation. A la fin des sept jours, ils pensent avoir mis la main sur une étoile vraiment intéressante. Mais il manque toujours des mesures pour en être sûr. Et le temps presse: lentement, l'astre descend vers l'horizon et deviendra bientôt invisible pour des mois. Concentrant leurs efforts sur *51 Peg*, Michel Mayor et Didier Queloz parviennent à tracer une éphéméride complète en janvier 1995, juste avant sa disparition du ciel.

A cet instant quelque peu suspendu, les astrophysiciens se tâtent: On y croit ou pas? Il

faut dire que les arguments contre l'existence d'une planète comme celle de *51 Peg* sont alors légion. Le principal concurrent des Genevois, l'Américain Geoffrey Marcy, vient en effet de publier un rapport préliminaire selon lequel, sur la base de l'analyse de 25 étoiles, il n'existe pas d'exoplanètes géantes. En février 1995, se basant sur le suivi d'une vingtaine d'étoiles au cours d'une décennie, le théoricien américain Alan Boss parvient, lui, à la conclusion que s'il existe des planètes géantes comme Jupiter dans d'autres systèmes solaires, elles ne peuvent avoir une période orbitale plus courte que dix ans.

BATTERIE DE TESTS

«Alors imaginez une période de quatre jours! s'exclame Michel Mayor. Nous n'avons aucun doute sur la qualité de nos mesures, mais de nombreuses autres interprétations étaient encore possibles (activité magnétique, pulsation de l'étoile, etc.). Le maître mot était donc la prudence. Et la discrétion. Nous n'avons donc rien publié et avons attendu le retour de l'étoile dans le ciel.»

En juillet, *51 Peg* revient au firmament. Les Genevois disposent une fois de plus d'une semaine d'observation à l'OHP. Une batterie de tests est infligée à l'astre qui les passe haut la main. Plus aucun doute n'est permis. *51 Peg* possède une demi-Jupiter qui met 4,2 jours à effectuer une orbite complète. Un article

«Nous nous étions préparés à un intérêt médiatique important. Ça a été la folie. On s'est dit que cela allait se calmer. Ça n'a pas été le cas»

scientifique est rédigé dans la foulée. Il paraît dans la revue *Nature* du 23 novembre 1995.

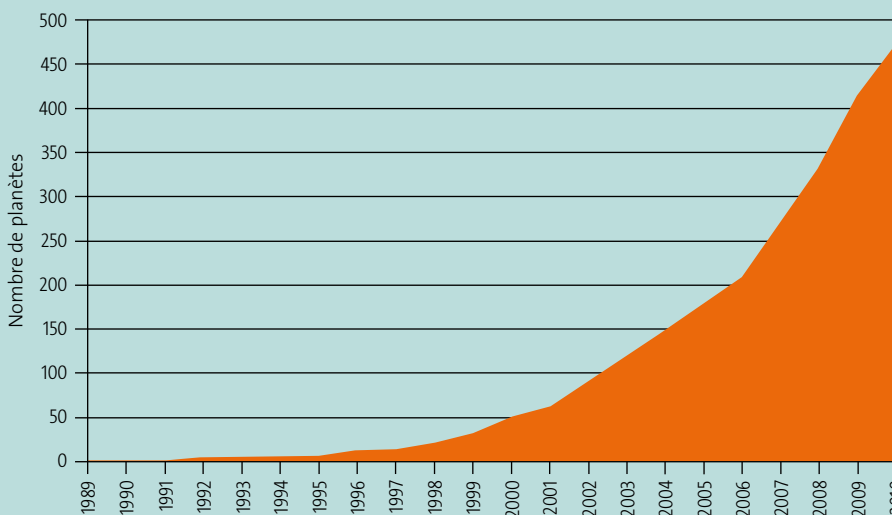
«Nous nous étions préparés à un intérêt médiatique important, précise Michel Mayor. Ça a été la folie. On s'est dit que cela allait se calmer. Ça n'a pas été le cas.» En plus d'éveiller la passion du grand public, la découverte de la première planète extrasolaire draine d'énormes moyens humains et financiers dans ce domaine de recherche. Astronomes, théoriciens, constructeurs d'instruments: en tout, ce sont des milliers de personnes qui travaillent aujourd'hui dans ce secteur. Résultat, plus de 400 planètes sont désormais connues dont plus du tiers a été découvert par l'équipe genevoise.

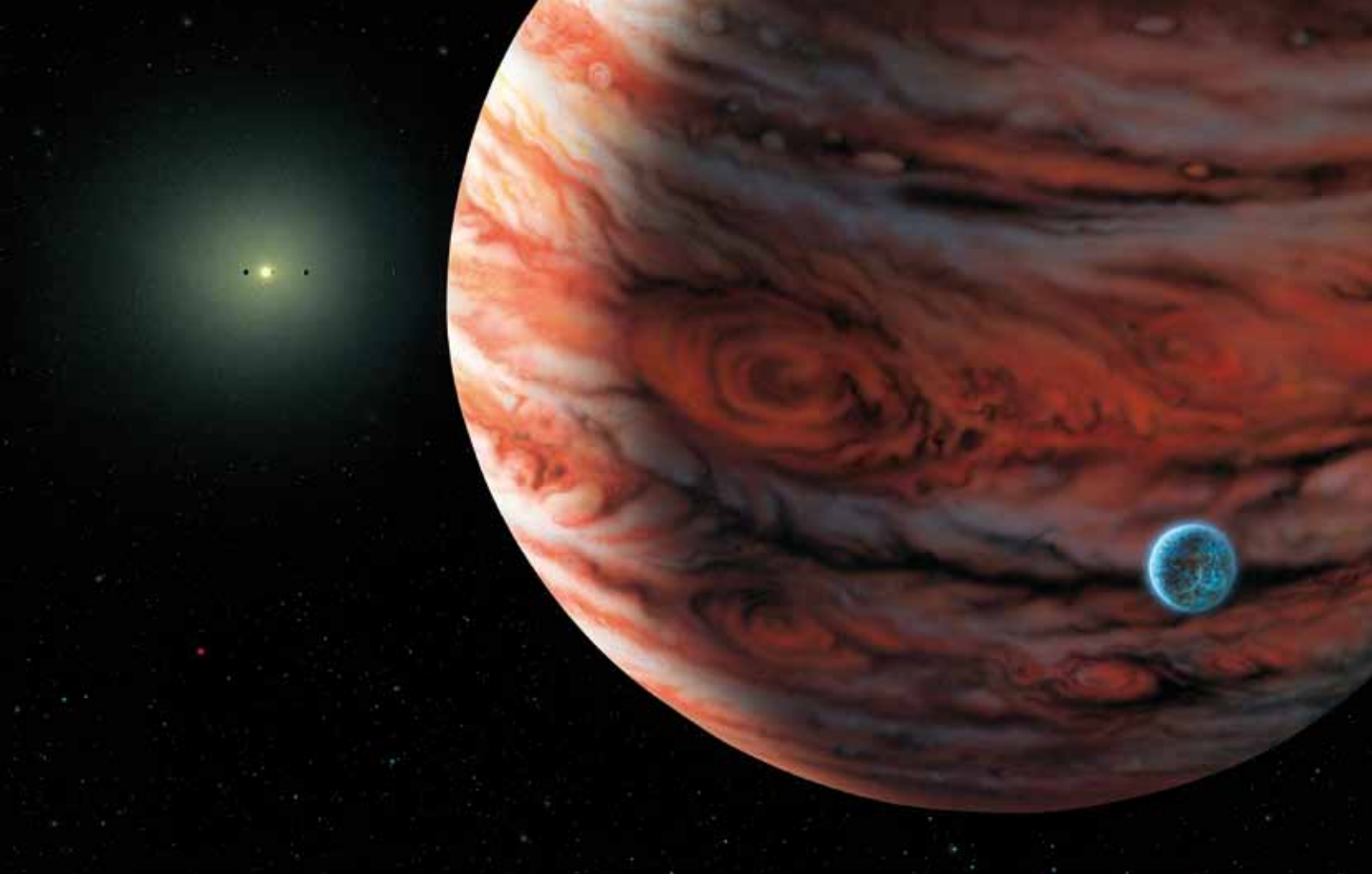
BELLE OPPORTUNITÉ

«Notre équipe s'est considérablement étoffée, admet Michel Mayor. Au début nous étions deux. Aujourd'hui nous sommes 20. Nous avons obtenu plus de moyens, mais cela s'est fait progressivement, sur quinze ans.» Du coup, le groupe s'est diversifié et les chercheurs se sont spécialisés dans différentes méthodes de détection: la vitesse radiale des étoiles, la plus utilisée à ce jour; la mesure du transit des planètes devant leur étoile, ce qui provoque une faible chute de luminosité de l'astre; l'astrométrie, qui détecte les mouvements d'une étoile sur la voûte céleste; l'imagerie planétaire, c'est-à-dire la photographie des planètes illuminées par leur étoile.

Cependant, la plus belle récompense a sans doute été l'opportunité de développer un nouvel instrument, commandé par l'ESO (*European Southern Observatory*) et correspondant aux «rêves les plus fous» d'un chasseur de planètes: HARPS. Construit à Genève, ce spectrographe est installé en 2003 sur le télescope de 3,6 mètres de diamètre à La Silla au Chili. «Fonctionnant sous vide, d'une stabilité à toute épreuve, thermiquement contrôlé à quelques millièmes de degré près, HARPS est notre vaisseau

Nombre cumulé d'exoplanètes





Au moins cinq planètes orbitent autour de 55 Cancri, une étoile binaire se trouvant à 41 années-lumière de la Terre, dans la constellation du Cancer. La plus grosse, ici au premier plan accompagnée d'un hypothétique satellite, est quatre fois plus massive que Jupiter. Les quatre autres évoluent beaucoup plus près de l'étoile. La plus petite d'entre elles possède une masse de quatorze fois celle de la Terre. ILLUSTRATION: LYNETTE COOK

amiral, s'enthousiasme Michel Mayor. Il n'a pas d'équivalent au monde. Il détecte des vitesses radiales d'étoiles de moins d'un mètre par seconde.»

En contrepartie de la fabrication de ce bijou, le consortium dirigé jusqu'à récemment par Michel Mayor (remplacé en 2008 par Stéphane Udry, professeur à l'Observatoire astronomique de Genève) est gâté par l'ESO puisqu'il reçoit 500 nuits de télescope sur cinquans. Cette générosité combinée aux performances de HARPS permettent de nombreuses découvertes dont celle de la plus petite planète extrasolaire connue à ce jour (sa masse vaut 1,5 fois celle de la Terre). Cette planète est toutefois si proche de son étoile que sa surface est probablement couverte de laves éternelles.

Au moment de sa mise en fonction, HARPS offre un avantage décisif aux Genevois vis-à-vis de leurs concurrents les plus directs qui ont, dans le passé, opté pour une technologie différente dans la conception de leur spectrographe. *«Le choix des Américains leur a donné durant plusieurs années l'avantage sur nous, explique Michel Mayor. En plus, ils ont accès au télescope Keck de 10 mètres de diamètre à Hawaï. Ce n'est pas rien. En bref, ils étaient deux fois plus précis que nous. Mais quand HARPS est arrivé, nous les avons largement dépassés tandis qu'eux ont buté sur une limite que leur technologie ne permet pas de franchir.»*

Du point de vue scientifique, la découverte de 51 Peg et de nombreuses autres planètes géantes situées très près de leur étoile a poussé les théoriciens à corriger leurs scénarios de la formation planétaire. Les mécanismes de base, proposés par Victor Safronov en 1969, demeurent inchangés (agglomération de grains de silicates ou de glace dans les régions extérieures du disque de gaz et de poussière qui s'appelle disque d'accrétion). La thèse d'Alan Boss reste également vraie: les planètes géantes ne se forment que dans les régions périphériques du disque d'accrétion.

MIGRATION ORBITALE

En revanche, la découverte de Michel Mayor a mis en lumière un phénomène très important qui avait été totalement négligé jusque-là: la migration orbitale. Ce processus a pour résultat qu'une géante gazeuse formée très loin de son étoile subit, dans certaines conditions, des effets gravitationnels complexes et commence à suivre une trajectoire en forme de spirale jusqu'à se retrouver dans une orbite très proche de son étoile. La migration orbitale est à l'origine de la grande diversité des systèmes découverts à ce jour.

«Notre système solaire n'a quasiment pas connu de migration orbitale, précise Michel Mayor. Les planètes n'évoluent pas très loin de l'endroit où elles

ont été créées. Cela vient peut-être du fait que le disque d'accrétion n'était pas bien massif et relativement pauvre en métaux. Il a donc disparu rapidement sans générer une migration orbitale importante.»

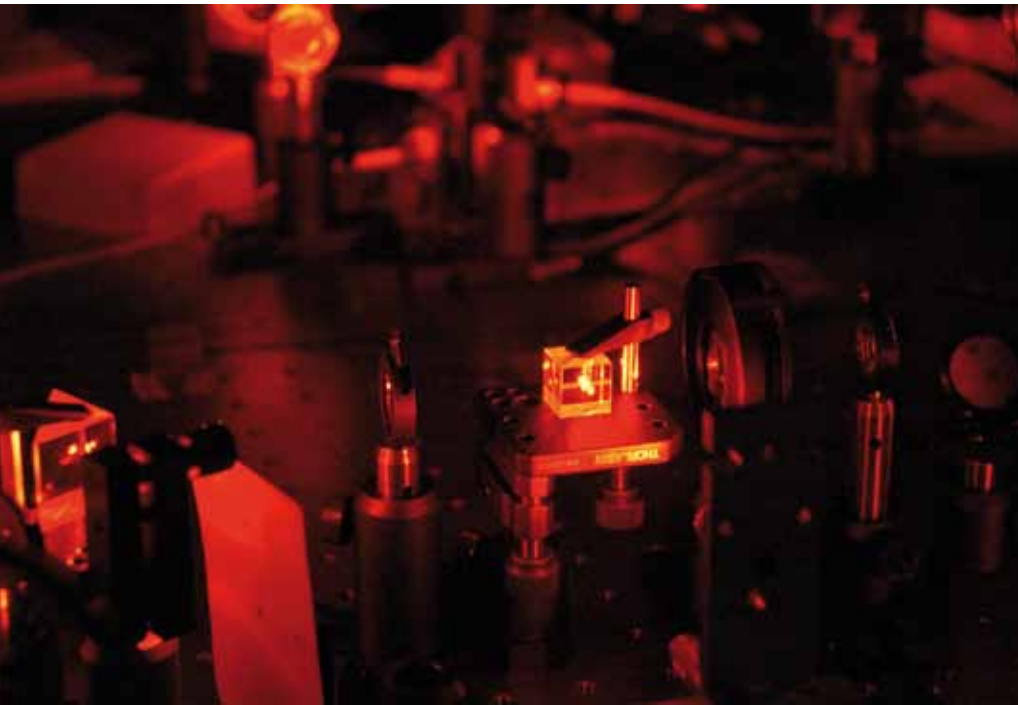
Ces effets gravitationnels sont parfois si violents qu'ils entraînent des bouleversements bien plus importants, comme l'apparition de planètes rétrogrades (tournant dans le sens contraire de la rotation de l'étoile) ou de planètes évoluant dans des plans orbitaux très inclinés (parfois perpendiculaires au plan équatorial de l'astre central).

Pour l'astronome genevois, pourtant, la plus importante contribution scientifique de son groupe a été de découvrir l'existence d'essaims de petites planètes (entre une et dix fois la masse de la Terre) très proches de leur étoile. Au moins 30% des étoiles de type solaire possèdent ce genre d'essaims qui représentent une configuration inédite puisque notre système solaire en est dépourvu.

Au point où en sont la technologie et l'expérience des observateurs du ciel, la chasse est désormais ouverte pour trouver une cousine de la Terre. La détection de la présence de planètes rocheuses dans la zone habitable, c'est-à-dire à une distance telle de leur étoile que l'eau peut être liquide et que la chimie complexe à l'origine de la vie puisse s'y développer, est plus que jamais à portée de spectrographe. ■

LA SECONDE RÉVOLUTION QUANTIQUE

Le terme de «communication quantique» est récent. Il désigne un champ de recherche qui a explosé au cours de ces vingt dernières années et est aujourd'hui perçu comme stratégique. Les enjeux sont de taille: confidentialité absolue des communications, invention du premier ordinateur quantique, etc.



Détail d'une expérience de téléportation quantique.

Intrication, cryptographie quantique, téléportation, qubit, répéteur quantique, ordinateur quantique... Ce vocabulaire exotique, regroupé aujourd'hui sous le terme plus général de «communication quantique», pourrait bien un jour envahir et bouleverser profondément la société de l'information telle que nous la connaissons actuellement. Les perspectives, il faut le dire, sont spectaculaires: confidentialité absolue des communications, augmentation considérable des capacités de calcul pour certaines tâches, etc. C'est pour ces raisons, sans doute, que les spécialistes qualifient l'avènement de cette branche encore débutante, mais déjà en plein essor, de «seconde ré-

volution quantique» – la première désignant les premiers pas triomphants de la physique quantique au début du XX^e, sous l'impulsion notamment des travaux d'Albert Einstein et de Niels Bohr.

Le début de cette révolution peut, plus ou moins arbitrairement, coïncider avec une date. Celle de la publication d'un article dans la revue *Physical Review Letters* du 5 août 1991. Le physicien britannique Artur Ekert y décrit à quoi devrait ressembler une expérience de cryptographie quantique basée sur l'intrication (lire ci-contre), c'est-à-dire une technique permettant d'exploiter les étranges corrélations quantiques (l'intrication) afin de

chiffrer un message de manière absolument inviolable. Bref, le rêve pour tous ceux qui souhaitent, par exemple, sécuriser définitivement les transactions financières ou les communications militaires et stratégiques contre les attaques des pirates informatiques d'aujourd'hui et, surtout, du futur.

Bien qu'il soit purement théorique, l'article d'Artur Ekert offre pour la première fois la possibilité de développer une application concrète de l'intrication, dans le domaine des communications, en exploitant les propriétés quantiques des particules élémentaires.

PROFIL UNIQUE

«Ce premier article, je l'ai manqué, se souvient Nicolas Gisin, professeur au Groupe de physique appliquée (Faculté des sciences). C'est un papier ultérieur, paru en 1992 par Charles Bennett, qui a attiré mon attention. En le lisant, je me suis dit que j'avais les connaissances nécessaires et tout ce qu'il fallait dans mon laboratoire pour réaliser une expérience de cryptographie quantique.»

Le chercheur genevois possède alors en effet une formation en physique quantique ainsi qu'une expérience de cinq ans dans l'industrie des télécommunications qui lui a permis de se familiariser avec le maniement des fibres optiques et les effets de polarisation de la lumière qui les traverse. Fort de cette double compétence, le scientifique genevois présente un profil unique à cette époque.

Par ailleurs, Nicolas Gisin dispose dans son laboratoire de détecteurs de photons capables de mesurer ces grains de lumière individuellement. En fait, ces appareils, il les a achetés avant tout par fascination, sans savoir exactement qu'en faire. Mais c'est grâce à eux qu'il pourra bricoler l'une des premières démonstrations expérimentales de cryptographie quantique réalisée dans des fibres optiques.

J. VAN HOUWELINGEN

L'équipe qu'il dirige parvient à transmettre une clé de cryptage – qui est la base de cryptographie – à travers un kilomètre de fibre. Cette clé est protégée par les lois de la physique quantique. Elle est parfaitement aléatoire et confidentielle. Ces résultats paraissent dans la revue *Europhysics Letters* du 20 août 1993 et font connaître l'équipe genevoise dans le monde de la physique internationale.

CRYPTOGRAPHIE SOUS LE LAC

Nicolas Gisin choisit alors de changer de matériel afin d'utiliser les mêmes fibres optiques que celles exploitées par Swisscom (alors Télécoms PTT) pour transmettre ses communications téléphoniques. Ce choix implique toutefois le développement de détecteurs de photons uniques ayant les longueurs d'onde utilisées dans les télécommunications. Cette adaptation permet de sortir la cryptographie quantique du laboratoire. Une première expérience est ainsi réalisée dans des fibres industrielles de 23 kilomètres reliant Genève à Nyon en passant sous le lac. Elle est rapportée par la

«Cela peut paraître curieux après coup, mais sur le moment je n'ai pas déposé de brevet sur cette expérience»

revue *Nature* du 30 novembre 1995. La communication quantique entre dans le monde réel.

«Cela peut paraître curieux après coup, mais sur le moment, je n'ai pas déposé de brevet sur cette expérience, contrairement à Swisscom qui le possède toujours, admet Nicolas Gisin. Cela est dû au fait qu'Unitec [le service de l'Université de Genève qui valorise les découvertes issues de ses activités de recherche] n'existait pas encore. Mais je dois admettre que je ne croyais pas vraiment qu'une telle expé-

rience pouvait avoir un avenir industriel. Je la considérais plutôt comme une illustration merveilleuse de la physique quantique. J'ai changé d'avis depuis.» La preuve: en 2001 il cofonde la start-up id Quantique qui est active dans la cryptographie et est récemment entrée dans les chiffres noirs.

INTRIGANTE INTRICATION

Mais avant d'en arriver là, les Genevois, à l'instar de plusieurs autres équipes dans le monde, planchent déjà sur le défi suivant: l'«intrication quantique». Cette propriété surprenante autorise deux particules à conserver entre elles un lien, même si elles sont éloignées l'une de l'autre de plusieurs kilomètres. Ce lien – l'intrication – fait qu'une mesure sur la première particule influence immédiatement l'état de la seconde, comme si elles formaient un seul et même objet, bien que situé en deux endroits différents. Ce tour de passe-passe, qui s'appelle la non-localité (un concept qui avait provoqué un fort scepticisme chez Albert Einstein en son temps), est potentiellement très intéressant pour la cryptographie quantique. ►

Quelques règles à respecter pour la cryptographie quantique

L'idée de la cryptographie quantique a été proposée pour la première fois dans les années 1980, mais en des termes élémentaires, sans le phénomène d'intrication et publiée dans une revue confidentielle. L'intuition de chercheurs comme Stephen Wiesner, Charles Bennet et Gilles Brassard a été de tourner des règles à première vue négatives de la physique quantique en des atouts décisifs.

La première de ces règles est que l'on ne peut pas effectuer une mesure d'un système quantique (une simple particule, par exemple) sans le perturber, voire le détruire. Dans l'idée de transmettre un message secret, cela est bien utile, puisque si un espion (Eve) désire l'intercepter, il alerterait immédiatement les deux interlocuteurs (Alice et Bob).

Une autre règle de la quantique stipule qu'il est impossible de mesurer la polarisation d'un photon simultanément dans deux bases différentes (la première étant tournée de 45° par rapport à la deuxième). Par exemple, si Alice envoie un photon polarisé verticalement et que Bob, ignorant cela, choisit de le mesurer dans une base diagonale (incliné de 45°), il obtiendra un résultat totalement indéterminé, dont il ne peut rien faire – c'est la physique quantique, c'est comme ça. En revanche si les deux choisissent par hasard la même base, alors le résultat est déterminé et l'on peut lui donner une valeur. Celle-ci peut être 1 (si Bob effectue la même mesure qu'Alice, c'est-à-dire verticale dans ce cas) ou 0 (s'il choisit la mesure horizontale). C'est ce qu'on appelle des qubit, par analogie aux bits classiques.

Cela demande, d'une part, qu'Alice connaisse l'état de la polarisation des photons qu'elle envoie à Bob et, de l'autre, que Bob envoie à Alice la liste des bases successives dans lesquelles il a effectué ses mesures. Ceci afin de pouvoir éliminer les résultats indéterminés et ne garder que ceux qui ont été créés et mesurés dans la même base. Cette liste de bases utilisées par Bob peut être publique, puisqu'elle ne prédit rien sur les résultats de la mesure. Si, en plus, la succession des états des photons envoyés par Alice est parfaitement aléatoire, ce que permet la physique quantique par différents moyens, il est possible de fabriquer une clé de cryptage inviolable connue des deux seuls interlocuteurs.

A partir de là, on revient à la cryptographie classique. Alice encode le texte grâce à une clé que personne ne connaît et qu'aucun ordinateur au monde ne peut casser. Le message est transmis et Bob le décrypte à l'aide de la même clé.

Si Eve tente d'intervenir au moment où la clé est élaborée, lors de l'échange de photons polarisés, elle perturbe inévitablement la communication. Bob et Alice n'ont qu'à choisir une séquence prise au hasard de la clé qu'ils ont fabriquée et la comparer pour voir si des incohérences apparaissent.

Une troisième règle de la quantique empêche qu'Eve réinjecte dans le canal quantique établi entre Alice et Bob un photon identique à celui qu'elle a espionné et donc détruit. Car si, à l'instar de Bob, elle mesure dans la mauvaise base (ce qui arrive une fois sur deux en moyenne), l'état du photon est indéterminé. Et il est impossible, en physique quantique, de dupliquer un état quantique indéterminé. ■

La première preuve expérimentale de l'existence de l'intrication est apportée par le physicien français Alain Aspect en 1982. Mais il faut attendre les années 1990 pour que des développements supplémentaires apparaissent. Cette fois encore, le groupe de Nicolas Gisin se distingue en réalisant la première expérience d'intrication dans les fibres optiques télécoms, entre les villages de Bernex et de Bellevue, éloignés de 10 kilomètres, une prouesse qui est publiée dans la revue *Science* du 25 juillet 1997.

TÉLÉPORTER LES CLÉS

Mais ce n'est pas tout. Le monde quantique autorise également des phénomènes aussi fantasmatiques que la «téléportation». Pour couper court aux rêves des fans de *Star Trek*, il ne s'agit de rien d'autre, pour l'instant, que du transfert de l'état physique d'une particule (la valeur de sa polarisation, par exemple) à une autre, par l'entremise de paires de particules intriquées. Tout au plus les chercheurs parviennent-ils à téléporter un état physique d'un atome à l'autre. Il n'est pas – encore – question de voyager gratis dans l'univers.

Le principal intérêt de cette propriété est qu'elle est potentiellement capable de résoudre un des problèmes techniques sur lequel bute la cryptographie quantique: la distance. En effet, s'il est désormais possible de créer des clés de chiffrement parfaitement aléatoires et de les transmettre de manière totalement confidentielle entre deux interlocuteurs, les propriétés quantiques se perdent dans les fibres optiques et au bout de quelques centaines de kilomètres, la nécessité d'une amplification du signal se fait sentir.

«*Le souci, c'est que les effets quantiques ne peuvent être amplifiés*, précise Nicolas Gisin. *La téléportation quantique permet en revanche de concevoir des "répéteurs". Grâce à eux, la communication quantique pourrait s'allonger et traverser des distances beaucoup plus importantes qu'aujourd'hui. Ce domaine fait l'objet d'intenses recherches partout dans le monde.*»

Jamais à la traîne, l'équipe genevoise parvient, en 2003, à réaliser la première téléportation quantique à longue distance dans des fibres optiques télécoms (2 kilomètres), dont les résultats paraissent dans la revue *Nature*

du 30 janvier 2003. Un premier pas vers le développement de répéteurs, un sujet sur lequel elle planche également.

Cela dit, le Graal de la communication quantique reste l'ordinateur quantique. Un tel engin n'existe pas encore, mais de nombreux chercheurs ont déjà tenté d'imaginer ses spécificités. Il fonctionnerait avec un grand nombre d'atomes intriqués durant le temps nécessaire pour effectuer les opérations demandées. Cet appareil ne serait pas forcément plus gros, plus petit ou plus rapide qu'un ordinateur classique. Mais il fonctionnerait sur des principes totalement différents et serait capable d'opérations inédites, comme l'a montré l'algorithme qu'a développé le mathématicien américain Peter Shor en 1994. Grâce à lui, un ordinateur quantique serait capable de factoriser facilement des grands nombres, contrairement aux super-ordinateurs classiques actuels. Cela signifie, en d'autres termes, que la mise en œuvre du premier ordinateur quantique permettrait de casser immédiatement n'importe quelle clé publique de cryptographie utilisée aujourd'hui pour les transmissions sécurisées. L'argent électronique perdrait instantanément toute sa valeur. C'est peu dire que cette nouvelle a fait du bruit.

CHAMP STRATÉGIQUE

Il n'est pas étonnant, dès lors, que la cryptographie quantique soit devenue un champ de recherche stratégique puisqu'elle pourrait faire face à cette menace vague mais terrifiante. Tous les grands pays sont désormais actifs dans ce domaine. Les Etats-Unis, bien sûr, même si une grande partie de leurs activités demeurent secrètes, ainsi que plusieurs équipes japonaises et européennes, dont celle de Nicolas Gisin. Phénomène récent, on trouve aussi beaucoup de groupes en Chine. «*Quasiment inexistant il y a vingt ans, les physiciens chinois sont très actifs et ils submergent littéralement les revues scientifiques occidentales avec leurs résultats, parmi lesquels on trouve des travaux de qualité très variable, mais qui comprennent tout de même de bonnes choses*, estime le chercheur genevois. *D'ailleurs, si je devais parier sur la première nation qui parviendra à réaliser une communication cryptée de manière quantique entre un satellite et la Terre, je miserais sur la Chine.*» ■

Les applications du futur

La cryptographie n'est pas la seule application de la communication quantique. Les chercheurs en ont déjà élaboré un certain nombre (sans même parler de toutes celles que l'on n'imagine pas encore).

L'une d'elles consiste à partager un secret entre un certain nombre de personnes (le contenu d'un testament entre les héritiers, par exemple) de telle façon que la seule manière de le rendre intelligible est de rassembler toutes les parties du message. Chaque extrait pris séparément ou un texte dans lequel il manquerait un seul contributeur seraient irrémédiablement illisibles.

Une autre application est la possibilité d'interroger une base de données via Internet sans laisser aucune trace de son passage. Nul doute qu'une telle perspective intéresse beaucoup de monde.

Une dernière idée: la communication quantique permettrait à un réseau de serveurs de mettre à jour leurs données seulement s'ils sont tous coordonnés. S'il s'agit du prix d'une marchandise sur un marché boursier, par exemple, cela éviterait aux tricheurs de profiter des petites différences de délais pour spéculer.