

LA FORCE QUANTIQUE

LE MAGAZINE
SCIENTIFIQUE
DE L'UNIVERSITÉ
DE GENÈVE

N° 147
DÉCEMBRE 2021

CAMPUS



P. 18 LES TECHNOLOGIES QUANTIQUES,
EXPLOITANT LES PROPRIÉTÉS DÉROUTANTES
DES PARTICULES ET DES ATOMES,
BÉNÉFICIENT D'INVESTISSEMENTS QUI SE
COMPTENT EN MILLIARDS D'EUROS. LES
PHYSIENNES ET PHYSIENS SUISSES SONT
À LA POINTE MONDIALE DANS CE DOMAINE
ALLIANT CRYPTOGRAPHIE, ORDINATEURS,
SENSEURS ET MATÉRIAUX QUANTIQUES.

BIOLOGIE
DE LA TROMPE DE
L'ÉLÉPHANT SORTIRA
LE ROBOT DE DEMAIN
PAGE 10

EXTRA-MUROS
SUR LES TRACES
DU TEMPLE PERDU
D'ARTÉMIS
PAGE 46

TÊTE CHERCHEUSE
IRENE STRASLY,
LE CHANT
DU SIGNE
PAGE 50



ET POURQUOI PAS À VÉLO?



www.unige.ch/velo

#unigevelo



UNIVERSITÉ
DE GENÈVE

04 ACTUS

RECHERCHE

10 BIOLOGIE
DE LA TROMPE
DE L'ÉLÉPHANT
SORTIRA LE ROBOT
DE DEMAIN



Une étude est parvenue à décortiquer le comportement de l'appendice nasal du pachyderme en une vingtaine de mouvements de base. Une avancée majeure vers le développement d'un bras robotique souple.

12 NEUROSCIENCES
LA SÉROTONINE
FREINE L'ADDICTION
À LA COCAÏNE



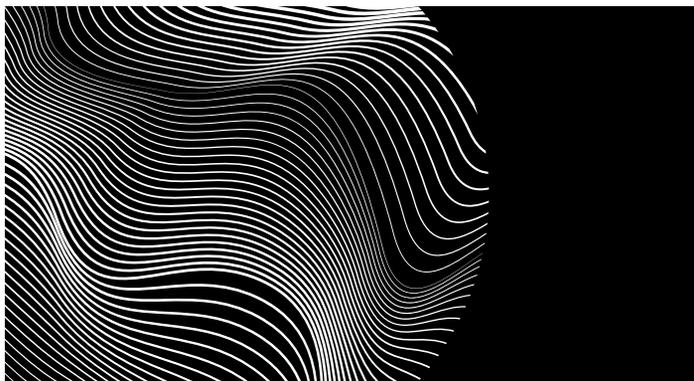
Si seulement un consommateur régulier de cocaïne sur cinq succombe à l'addiction, c'est parce que la sérotonine joue un rôle qui contre celui de la dopamine. Une étude explique le mécanisme qui est mis en œuvre.

15 ÉCONOMIE
ENQUÊTE SUR LES
CHAÎNES MONDIALES
DE VALEUR

En s'appuyant sur l'étude de deux entreprises suisses actives dans le domaine des machines-outils, Aris Martinelli démontre que les grands groupes fonctionnant en réseaux issus de la mondialisation conduisent à une dégradation globale des conditions de travail de leurs salarié-es.



DOSSIER: LA FORCE QUANTIQUE



20 LA RECHERCHE SUISSE MARGINALISÉE PAR L'EUROPE

L'Union européenne considère la recherche sur les technologies quantiques comme stratégique et a exclu la Suisse de ses programmes scientifiques dans ce domaine. Les physiciens suisses, qui sont à la pointe mondiale dans plusieurs disciplines, cherchent une solution à ce coup dur.

26 PETITE HISTOIRE DE LA CRYPTOGRAPHIE QUANTIQUE

L'Université de Genève joue un rôle de leader mondial dans la recherche en matière de cryptographie quantique. Elle détient notamment le record de distance (421 km) pour la distribution d'une

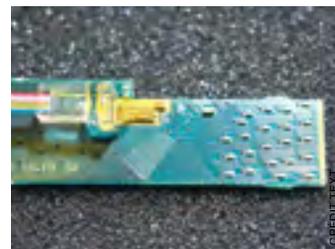
clé quantique dans une fibre optique. Petit retour sur les étapes clés d'une histoire qui dure depuis bientôt trente ans.

34 ID QUANTIQUE, DU LABO AUX SMARTPHONES

La start-up spécialisée dans la communication quantique, née il y a exactement vingt ans à l'Université de Genève, est une véritable « success-story ».

37 L'ORDINATEUR QUANTIQUE À LA CROISÉE DES CHEMINS

Il existe des ordinateurs quantiques mais ils sont encore trop petits pour être capables de surpasser leurs homologues classiques. Le potentiel de telles machines est toutefois



énorme. Les défis scientifiques et technologiques pour les développer le sont tout autant.

40 UNE SENSIBILITÉ À FLEUR DE PARTICULES

Exploitant les propriétés de la théorie qui régit le monde du tout petit, les capteurs quantiques offrent une sensibilité et une précision inédite, à l'exemple d'un dispositif – théorique – capable de transformer la plus minuscule augmentation de chaleur en un courant électrique utile.

43 LE GRAPHÈNE, UN MONDE EN DEUX DIMENSIONS

Le graphène, une couche monoatomique de carbone, ainsi que ses dérivés (composés d'autres éléments) pourraient représenter, grâce à leurs propriétés surprenantes, les briques de base pour fabriquer les matériaux de demain.

Illustration de couverture: Bontron&Co

RENDEZ-VOUS



46 EXTRA-MUROS SUR LES TRACES DU TEMPLE PERDU D'ARTÉMIS

Connu depuis l'Antiquité comme un important lieu de culte, le temple d'Artémis situé sur l'île d'Eubée a longtemps échappé aux archéologues. Localisé en 2007, il a livré l'an dernier une quantité exceptionnelle de trouvailles.



50 TÊTE CHERCHEUSE LE CHANT DU SIGNE

Irene Strasy s'est vu décerner la Médaille de l'innovation de l'Université lors du dernier Dies academicus. Une récompense qui salue la mise en place de plusieurs formations académiques à destination des personnes sourdes et malentendantes. Portrait.



54 À LIRE

RITA TRIGO TRINDADE
LAURÉATE DU CREDIT
SUISSE AWARD FOR BEST
TEACHING 2021



Professeure du Département de droit commercial (Faculté de droit), Rita Trigo Trindade est la lauréate du Credit Suisse Award for Best Teaching 2021, un prix qui récompense chaque année un ou une auteur-e d'actions innovantes favorisant l'apprentissage au sein de l'Université de Genève. Rita Trigo Trindade a reçu cette distinction pour un projet de *serious game* consistant à placer les étudiants et les étudiantes dans la situation d'un-e avocat-e stagiaire qui, sous la surveillance d'un-e maître de stage, accompagne un client dans sa demande de création d'une société ou dans celle de faire un prélèvement important dans les fonds de la société.

DES ÉTUDIANTS EN MATH
REMPORTENT LA DATA
MINING CUP

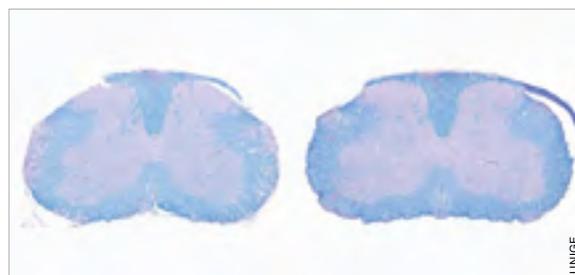
Quatre étudiants de la Section de mathématiques (Faculté des sciences), Tibaut Lunet, Léo Malli, Léo Nicollier et Juraj Rosinsky, ont décroché la première place du Data Mining Cup, un concours invitant étudiants et étudiantes du monde entier à tester leurs connaissances sur une tâche réelle de *data mining*. Avec leur solution (un modèle mathématique permettant de calculer des recommandations de livres pertinentes pour une librairie en ligne), les quatre mathématiciens ont battu 115 équipes de 28 pays qui participaient à la compétition.

MÉDECINE

Le froid détourne l'attention de la sclérose en plaques

En étudiant des souris souffrant de sclérose en plaques, une équipe menée par Mirko Trajkovski, professeur au Département de physiologie cellulaire et métabolisme (Centre du diabète de la Faculté de médecine), a découvert que l'exposition au froid poussait l'organisme à détourner ses ressources du système immunitaire vers le maintien de la chaleur corporelle. Il en résulte, comme le rapporte l'article paru dans la revue *Cell Metabolism* du 2 novembre, que le système immunitaire diminue la partie de son activité néfaste, celle qui est tournée contre son propre organisme, ce qui atténue considérablement l'évolution de la maladie auto-immune.

La sclérose en plaques est la maladie auto-immune la plus courante du cerveau et de la moelle épinière. Elle se caractérise par la destruction de la myéline, une isolation protectrice des cellules nerveuses qui joue un rôle important dans la transmission correcte et rapide des signaux électriques. Sa destruction entraîne des troubles neurologiques et peut notamment conduire à la paralysie. L'amélioration



Moelle épinière démyélinisée de souris souffrant d'une maladie auto-immune. À gauche, à température ambiante, et à droite, exposée au froid. La myéline est colorée en bleu. La coloration mauve montre les lésions démyélinisées, réduites dans l'image de droite.

des conditions de vie dans les pays occidentaux, notable au cours des dernières décennies, est allée de pair avec une augmentation des cas de maladies auto-immunes. Si cette augmentation est sans aucun doute multifactorielle, le fait que l'humain dispose de ressources énergétiques en abondance pourrait jouer un rôle important, mais encore mal compris, dans le développement de ces affections.

ONCOLOGIE

Nouvelle combinaison thérapeutique contre le cancer colorectal

Le cancer colorectal, deuxième cause de mortalité liée au cancer dans le monde, reste réfractaire à l'immunothérapie dite par blocage des points de contrôle immunitaire (ICB) qui a pourtant, ces dernières années, révolutionné le traitement de nombreux autres types de tumeurs. En particulier, lorsque ce type de cancer se propage au foie, seuls 5 % des personnes répondent positivement. Comme l'explique un article paru le 19 octobre dans *Proceedings of the National Academy of Sciences* cette résistance pourrait être due à l'absence d'un type particulier de cellules, celles dites dendritiques, dont le pouvoir antitumoral est pourtant essentiel, dans les métastases hépatiques du cancer colorectal. C'est ce qu'a constaté l'équipe menée par Mikaël Pittet,

titulaire de la chaire Fondation Isrec en immuno-oncologie au Département de pathologie et immunologie et au Centre de recherche translationnelle en onco-hématologie (Faculté de médecine). Les auteurs suggèrent par conséquent qu'en renforçant la présence de ces cellules dendritiques dans les tumeurs – en l'occurrence grâce à l'administration d'un facteur de croissance –, les immunothérapies pourraient gagner en efficacité.

Des expériences dans ce sens menées sur des souris ont donné lieu à une nette amélioration de l'efficacité des immunothérapies ICB. Des évaluations cliniques doivent toutefois encore être conduites sur l'être humain pour s'assurer qu'un traitement combinant le facteur de croissance et la thérapie ICB est lui aussi efficace.

PSYCHIATRIE

Une intelligence artificielle détecte 80% des cas d'autisme à partir d'une vidéo

Bien que les troubles du spectre autistique représentent une affection fréquente dans la population, ils restent encore difficiles à diagnostiquer avant l'âge de 5 ans. Dans un article paru le 23 juillet dans la revue *Scientific Reports*, l'équipe de Marie Schaer, professeure au Département de psychiatrie (Faculté de médecine), propose, pour remédier à cette lacune, une nouvelle technique, basée sur l'intelligence artificielle (IA) et capable d'analyser la communication non verbale d'une personne. Très facile d'usage, cette technologie a correctement classifié dans 80% des cas de courtes vidéos montrant un enfant avec ou sans autisme jouer avec un adulte.

Le trouble du spectre autistique est caractérisé par des difficultés dans les interactions sociales et la communication et par la présence de comportements répétitifs et des intérêts restreints. Bien souvent, les enfants affectés éprouvent des difficultés à suivre un cursus scolaire. Pourtant, si le diagnostic est posé avant l'âge de 3 ans, il est souvent possible de rattraper ces retards de développement grâce à une intervention comportementale spécifique. La communication non verbale de l'enfant autiste diffère elle aussi de celle d'un enfant au développement normal (difficultés à regarder son interlocuteur, à sourire, à pointer des objets du doigt, la manière de s'intéresser à ce qui l'entoure...). Pour exploiter cette caractéristique, l'équipe a conçu un algorithme utilisant l'IA qui analyse en vidéo les mouvements des enfants interagissant avec une autre



Extraction des « squelettes » des personnes visibles sur une image.

personne et identifie si ceux-ci sont caractéristiques du trouble du spectre autistique ou non. Plus de 130 enfants de moins de 5 ans ont participé à la phase d'éducation et de test de l'IA. Une centaine d'autres ont permis d'effectuer un contrôle supplémentaire.

Les enfants sont d'abord enregistrés en vidéo alors qu'ils sont en train de jouer librement avec un ou une adulte. Ensuite, un logiciel spécial (OpenPose) extrait, sans nécessiter la pose de capteurs, les points clés du squelette de toutes les personnes présentes, ôte les détails tels que l'âge, le sexe, le décor, etc. et ne garde que des figurines en bâtonnets évoluant dans l'espace et le temps.

Selon l'article, l'IA a pu poser le bon diagnostic dans 80% des cas. Selon les auteurs, cette technologie permettrait aux parents, où qu'ils habitent, d'enregistrer une courte vidéo et de l'envoyer par Internet pour obtenir presque immédiatement une première évaluation automatisée des symptômes de l'autisme pour leur enfant – une évaluation qu'il faudrait encore confirmer par une consultation spécialisée.

EMMANOUIL DERMITZAKIS LAURÉAT DU PRIX CURT STERN 2021



La Société américaine de génétique humaine a décerné le prix Curt Stern 2021 à Emmanouil Dermitzakis, professeur au Département de médecine génétique et développement (Faculté de médecine). Ce prix récompense les chercheurs et chercheuses en génétique et en génomique qui ont apporté des contributions scientifiques importantes au cours de cette dernière décennie. Emmanouil Dermitzakis a été l'un des premiers scientifiques à révéler l'importance de l'ADN non codant dans l'évolution et la susceptibilité aux maladies.

LA SOCIÉTÉ EUROPÉENNE D'ORTHODONTIE DISTINGUÉE STAVROS KILIARIDIS



Stavros Kiliaridis, chef de la Division d'orthodontie de la Clinique universitaire de médecine dentaire, a reçu le *Distinguished Teacher Award* de la Société européenne d'orthodontie. Le professeur Kiliaridis a joué, ces vingt dernières années, un rôle prépondérant dans la formation en orthodontie à la Faculté de médecine. Ses travaux ont notamment porté sur les facteurs influençant la croissance dento-faciale et l'éruption dentaire post-émergente.

SCIENCES AFFECTIVES

La voix maternelle réduit la douleur chez les bébés prématurés

Lorsque la mère parle à son bébé prématuré pendant une des procédures médicales parfois douloureuses auxquelles il est soumis, les signes de douleur de l'enfant diminuent. C'est ce que l'équipe de Didier Grandjean, professeur à la Section de psychologie (Faculté de psychologie et des sciences de l'éducation) et au Centre interfacultaire en sciences affectives, a réussi à démontrer dans une étude parue le 27 août dans la revue *Scientific Reports*. Un bébé né prématurément est souvent séparé de ses parents et placé en couveuse aux soins

intenses où il est soumis à des procédures médicales parfois douloureuses sans qu'on puisse soulager sa douleur par trop d'analgésiques, risqués pour son développement.

Les scientifiques ont observé que lorsque la mère parle à son bébé à ces moments-là, les signes d'expression de la douleur du nourrisson diminuent et son taux d'ocytocine – l'hormone impliquée dans l'attachement et également liée au stress – augmente significativement, pouvant attester d'une meilleure gestion de la douleur.

VOLCANOLOGIE

La lente et sourde maturation de Toba, le supervolcan



Le lac Toba à Sumatra et son île créée par l'accumulation de magma dans le réservoir magmatique du volcan situé juste en dessous.

Sous le lac Toba, situé à Sumatra en Indonésie, tout se passe en silence. Environ 320 km³ de magma reposent dans le réservoir du volcan enfoui et sont prêts à entrer en éruption. À cette quantité gigantesque s'ajoutent quelque 4 km³ de magma supplémentaires tous les mille ans, de manière stable, depuis plusieurs dizaines de milliers d'années. Si une éruption devait se produire maintenant, elle détruirait l'île très peuplée de Sumatra et bouleverserait aussi profondément l'environnement mondial. C'est ce qui ressort d'une étude parue dans la revue *Proceedings of the National Academy of Sciences* du 9 novembre. Les résultats, obtenus par une équipe de géologues dont fait partie Luca Caricchi, professeur au Département des sciences de la Terre (Faculté des sciences), se basent sur une analyse des taux d'uranium et de plomb présents dans les zircons – un minéral expulsé lors d'éruptions volcaniques explosives. Elle a permis de déterminer combien de temps le volcan a mis pour préparer ses

superéruptions passées et d'affirmer que l'effet de surprise risque d'être total pour la suivante car aucun signe géologique inhabituel n'annoncera l'imminence de cet événement catastrophique.

Le zircon contient notamment de l'uranium qui, avec le temps, se désintègre en plomb. En mesurant les taux d'uranium et de plomb dans un zircon à l'aide d'un spectromètre de masse, il est possible de déterminer l'âge du cristal. Ces analyses ont fourni des informations sur la date de l'éruption, l'histoire de l'accumulation du magma qui l'a précédée et le taux d'entrée du magma dans un réservoir magmatique.

Le volcan Toba a déjà provoqué deux superéruptions au cours du dernier million d'années. La première, il y a 840 000 ans, et la seconde, il y a 75 000 ans, ont chacune éjecté environ 2800 km³ de matériaux, soit 70 000 fois la quantité de magma expulsée à ce jour par l'éruption actuelle du volcan de La Palma aux Canaries.

Selon les chercheurs, la prochaine éruption, de la taille des deux autres, pourrait avoir lieu dans environ 600 000 ans. Une estimation plutôt rassurante qui n'exclut pas, cependant, des éruptions plus petites entre-temps. Les géologues ne pourront toutefois pas compter sur des signes avant-coureurs tels qu'une augmentation significative des tremblements de terre ou un soulèvement rapide du sol. Leurs résultats montrent que ces derniers pourraient en effet ne pas être aussi évidents que ceux décrits dans les films catastrophes produits par l'industrie cinématographique.

MÉDECINE

Plus de la moitié des troubles auditifs de l'enfant ont une cause génétique

Dans 52 % des cas, les troubles auditifs neurosensoriels des enfants trouvent une cause génétique, une proportion jugée remarquablement élevée par une étude parue le 20 août dans la revue *Genes* et dirigée par Ariane Giacobino, professeure au Département de médecine génétique et développement (Faculté de médecine).

L'étude porte sur les troubles auditifs neurosensoriels ou de perception. Il s'agit de troubles qui ne guérissent pas et qui nécessitent la

pose d'un appareil auditif ou d'un implant cochléaire. Elle a porté sur neuf adultes et 61 enfants ayant des troubles de l'audition ou de perception, réhabilités par un appareil auditif ou un implant cochléaire.

L'étude révèle également que chez 46 % des enfants avec un diagnostic génétique, le trouble auditif est en réalité inscrit dans un contexte syndromique plus large, ce que le simple bilan ORL et de santé n'aurait pas permis de soupçonner.

ZOE MOODY ÉLUE VICE-PRÉSIDENTE DE LA SOCIÉTÉ SUISSE DE RECHERCHE EN ÉDUCATION



Zoe Moody, collaboratrice scientifique au Centre interfacultaire en droits de l'enfant et professeure à la HEP-VS, a été élue vice-présidente de la Société suisse de recherche en éducation. La SSRE a pour but d'apporter son soutien à la recherche en éducation dans un contexte scientifique national et international. Les activités de recherche et d'enseignement de Zoe Moody portent sur les droits de l'enfant et l'éducation, le vivre-ensemble et la diversité à l'école, les discriminations et le harcèlement entre pairs, ainsi que la recherche participative avec les enfants.

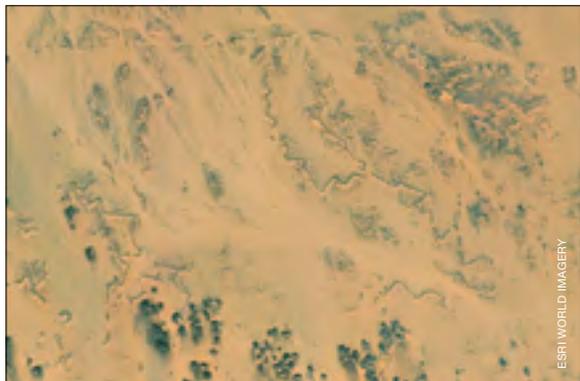
LE GRAND PRIX DES RENDEZ-VOUS DE L'HISTOIRE DE BLOIS POUR LUDOVIC TOURNÈS



Le dernier ouvrage de Ludovic Tournès, professeur au Département d'histoire générale (Faculté des lettres), *Américanisation. Une histoire mondiale (XVIII^e-XXI^e siècle)*, s'est vu décerner le Grand Prix des rendez-vous de l'histoire de Blois 2021 qui récompense un ouvrage d'histoire, en langue française, ayant contribué de façon remarquable au progrès de la recherche historique et/ou à sa diffusion, toutes périodes confondues (lire aussi *Campus n° 143*).

SCIENTES DE LA TERRE

Les rivières fossiles d'Égypte racontent la menace du réchauffement climatique



Une image satellite montre les morphologies des rivières fossiles du sud de l'Égypte. Cette étude démontre que ces rivières étaient intensément actives pendant la période humide africaine.

Il y a 10 000 ans, lorsque le Sahara égyptien était encore vert, les populations des rives du Nil ont dû subitement migrer. La cause ? les changements climatiques. Comme elle l'explique dans un article paru dans la revue *Quaternary Science Reviews*, une équipe de géologues dirigés par Sébastien Castelltort, professeur associé au Département des sciences de la Terre (Faculté des sciences), a en effet constaté qu'à la suite d'une rapide augmentation de la température d'environ 7 °C, la fréquence des événements de fortes pluies a été multipliée par quatre, augmentant les crues des rivières et forçant les riverains à se déplacer vers le centre du pays.

L'Afrique a connu une période humide, entre 14 800 et 5500 ans avant notre ère, caractérisée par un Sahara encore vert. La région du nord du lac Nasser en Égypte, aujourd'hui

aride, ne garde de traces de ce passé verdoyant que des rivières fossilisées. Ce sont elles qui ont permis de déterminer quelles étaient les quantités d'eau en circulation, ainsi que les quantités et les fréquences des pluies.

Premier indice : les galets. Les gros, par exemple, sont les témoins d'un important débit d'eau, capable de les transporter. La profondeur et la largeur de la rivière, elles, permettent de retracer le débit d'eau en mètres cubes par seconde. Associées à l'estimation de la surface du bassin de drainage, soit la zone qui connecte les eaux en amont de la rivière, ces données fournissent le taux de précipitations responsables du transport des sédiments étudiés.

Quant à la datation des rivières, elle a été réalisée à partir de l'analyse du carbone 14 contenu dans la matière organique piégée dans le lit fossilisé ainsi que de la mesure de la luminescence des quartz présents dans les sédiments. Effectuées sur six rivières de la région, ces mesures ont confirmé que les rivières étaient actives entre 13 000 et 5000 ans avant notre ère avec des précipitations très intenses, de 55 à 80 millimètres par heure et, surtout, 3 ou 4 fois plus fréquentes qu'avant la période humide africaine. Résultat : les crues violentes se sont multipliées, rendant les berges inhospitalières et poussant les riverains à déménager. Ce déchaînement des éléments coïncide également avec une augmentation de l'ordre de 7 °C des températures de cette région. De quoi réfléchir aux conséquences du réchauffement climatique actuel.

L'UNIGE, 60^e DU RANKING DE SHANGHAI DES MEILLEURES UNIVERSITÉS

L'Université de Genève confirme son ancrage dans le top 100 des meilleures universités mondiales selon le ranking de Shanghai dont elle occupe la 60^e place, en recul d'un rang par rapport à 2020. Son classement, stable depuis 2017, met plusieurs de ses disciplines en valeur sur la scène internationale, dont la physique qui entre dans le top 20 pour la première fois en se hissant à la 18^e position. La haute école suisse la mieux classée reste l'École polytechnique fédérale de Zurich (21^e), suivie par l'Université de Zurich (54^e) et l'UNIGE.

DÉVELOPPEMENT DURABLE : L'UNIGE CONSIDÉRÉE COMME « AMBITIEUSE »

Le WWF Suisse a publié en août son troisième rapport d'évaluation sur l'ancrage de la durabilité des hautes écoles suisses. Ces dernières sont nombreuses à avoir fait de nets progrès par rapport aux années précédentes mais aucune n'est encore pionnière en la matière. L'Université de Genève se classe néanmoins dans la catégorie juste en dessous, soit celle des institutions dites « ambitieuses », dominée par l'École polytechnique fédérale de Zurich, l'Université de Lausanne et celle de Berne.

Abonnez-vous à « Campus » !

par e-mail (campus@unige.ch)
ou en envoyant le coupon ci-dessous :

Je souhaite m'abonner gratuitement à « Campus »

Nom

Prénom

Adresse

N° postal/Localité

Tél.

E-mail

Découvrez les recherches genevoises, les dernières avancées scientifiques et des dossiers d'actualité sous un éclairage nouveau.

Des rubriques variées dévoilent l'activité des chercheuses et des chercheurs dans et hors les murs de l'Académie. L'Université de Genève comme vous ne l'avez encore jamais lue !



Université de Genève
Service de communication
24, rue Général-Dufour
1211 Genève 4
campus@unige.ch
www.unige.ch/campus

ASTROPHYSIQUE

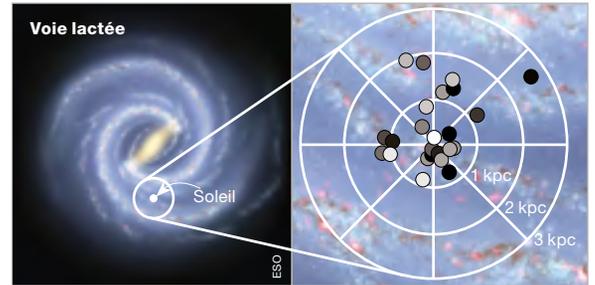
La double spirale de la Voie lactée est un bien mauvais mélangeur

EDMOND FISCHER, DIPLÔMÉ DE L'UNIGE ET PRIX NOBEL, EST DÉCÉDÉ



Edmond Fischer, lauréat du prix Nobel de physiologie ou médecine et diplômé à l'Université de Genève, est décédé le 27 août, à l'âge de 101 ans. Après ses études au Département de chimie, il a rejoint en 1950 l'Université de Washington à Seattle aux États-Unis. Il a conservé durant toute sa vie la double nationalité suisse et américaine et maintenu des contacts à Genève. Lui et son collègue Edwin Krebs ont reçu le prix Nobel en 1992 pour avoir découvert le mécanisme moléculaire permettant la phosphorylation réversible des protéines.

Les astronomes admettent communément que les gaz qui composent les galaxies sont bien mélangés et qu'en particulier la composition du milieu interstellaire dans le voisinage du Soleil est relativement constante. Cette hypothèse est en tout cas suffisamment bien admise dans la communauté scientifique pour servir de base à de nombreuses études observationnelles aussi bien que théoriques. La réalité semble être bien différente, toutefois, selon une étude parue dans la revue *Nature* du 8 septembre et dont Annalisa De Cia, professeure au Département d'astronomie (Faculté des sciences), est la première auteure. Effectuée à l'aide du télescope spatial Hubble et du Very Large Telescope au Chili, l'analyse de la composition du milieu interstellaire, mesurée avec une précision inédite en direction de 25 étoiles situées dans le voisinage solaire, montre en effet pour la première fois qu'il existe en réalité des disparités très importantes. Certaines régions affichent même une métallicité (c'est-à-dire la concentration de tous les éléments chimiques



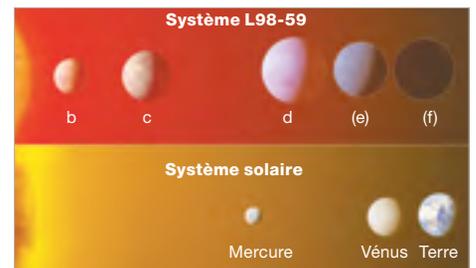
Vue d'artiste de la Voie lactée et des 25 étoiles du voisinage du Soleil ciblées par cette étude. Les niveaux de gris correspondent aux taux de métallicité mesurés. (3 kiloparsec égalent environ 10 000 années-lumière).

confondus autres que l'hydrogène et l'hélium) qui ne vaut que 10% de celle qui règne autour du Soleil. Les auteurs de l'article estiment que ces inhomogénéités sont dues à des gaz qui alimentent les galaxies depuis l'extérieur et qui ne contiennent que de l'hydrogène et de l'hélium. Ces nuages «vierges» se mélangent ensuite très mal dans le milieu interstellaire plus riche en métaux et provoquent des différences de compositions régionales sur des dizaines de milliers d'années-lumière.

ASTRONOMIE

La masse de la plus légère exoplanète connue vaut 40% de celle de la Terre

Une équipe d'astronomes, dont fait partie François Bouchy, professeur associé au Département d'astronomie (Faculté des sciences), a réussi à déterminer que la masse de la plus légère exoplanète connue à ce jour (L98-59b) est 0,4 fois celle de la Terre (ou la moitié de celle de Vénus). L'objet évolue sur une orbite très proche de son étoile, une naine rouge située à 35 années-lumière d'ici. L'étude, parue dans la revue *Astronomy & Astrophysics* du mois de septembre, détermine aussi la masse de deux autres planètes d'une taille comparable à la Terre (L98-59c et d), la seconde pouvant être constituée à 30% d'eau, ce qui en ferait une planète océan. L'équipe a enfin découvert une quatrième planète (e) et soupçonne même la présence d'une cinquième (f) qui pourrait se trouver pile dans la zone habitable de l'étoile et donc héberger de l'eau liquide à sa surface. Les mesures ont



Le système L98-59 (en haut) et le Système solaire (en bas) mis à l'échelle pour faire coïncider les zones habitables.

été réalisées à l'aide d'Espresso, un spectrographe de fabrication genevoise monté sur le Very Large Telescope au Chili. Elles confirment et complètent la découverte en 2019 par le satellite TESS de la NASA de trois planètes en transit autour de L98-59 ayant une taille (c'est-à-dire un rayon) comprise entre 0,85 et 1,52 fois celle de la Terre.

LA LÉGION D'HONNEUR DÉCERNÉE À HENRY PETER



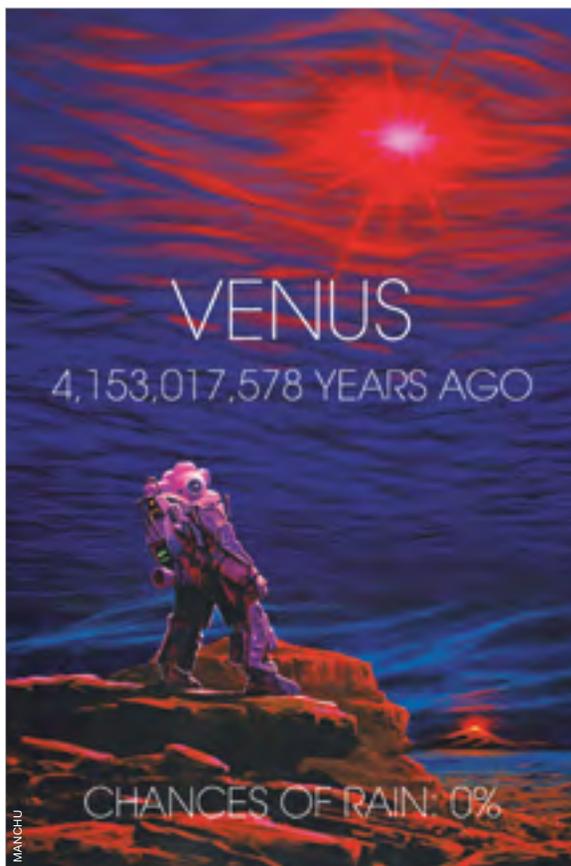
Professeur de droit et directeur du Centre en philanthropie de l'UNIGE, Henry Peter a été décoré de la Légion d'honneur par Jean Todt, ancien pilote de rallye français et directeur de Ferrari. Au cours de sa carrière, Henry Peter a développé une expertise en droit du sport, en particulier dans le domaine de la Formule 1, a été impliqué dans le traitement juridique de la faillite du groupe Swissair au début des années 2000 et a créé le Centre en philanthropie en 2017.

La Terre aurait échappé de peu au sort de Vénus, à jamais privée d'océans

EN SE BASANT SUR LES MODÈLES CLIMATIQUES, UNE ÉTUDE A CONCLU QUE LES CONDITIONS RÉGNANT SUR VÉNUS **N'ONT JAMAIS PERMIS LA CONDENSATION DE LA VAPEUR D'EAU** PRÉSENTE DANS SON ATMOSPHÈRE. UN SORT AUQUEL LA TERRE A PU ÉCHAPPER DE JUSTESSE.

Il restait un petit espoir que dans le passé lointain du Système solaire, Vénus, à l'image de sa voisine la Terre à laquelle elle ressemble beaucoup, ait pu abriter de la vie ou, du moins, présenter certaines caractéristiques propices à son éclosion. Comme un océan d'eau, par exemple, sans lequel on imagine mal qu'une telle étape puisse être franchie. Un article paru le 13 octobre dans la revue *Nature* porte toutefois un coup dur à cette hypothèse. Ses auteures, menées par Martin Turbet, chercheur au Département d'astronomie (Faculté des sciences) et membre du Pôle de recherche national PlanetS, y montrent en effet, sur la base de modèles sophistiqués, que les conditions climatiques régnant à la surface de Vénus n'ont jamais permis la condensation de la vapeur d'eau de son atmosphère. Un sort auquel, toujours selon les mêmes modèles informatiques, la Terre aurait d'ailleurs échappé de justesse.

La planète Vénus, telle qu'elle apparaît aujourd'hui, peut être considérée comme la jumelle maléfique de la Terre. À première vue, sa masse et sa taille sont comparables à celles de la planète bleue. Elle est composée essentiellement de matériaux rocheux, contient un peu d'eau et possède une atmosphère. Toutefois, l'épaisse atmosphère de CO₂, la température et la pression extrêmes qui règnent à sa surface ainsi que les nuages d'acide sulfurique créent des conditions infernales rendant la vie actuellement impossible sur Vénus. Certaines études antérieures ont néanmoins suggéré que, par le passé, celle que l'on surnomme l'« étoile du berger » aurait pu être un endroit beaucoup plus hospitalier, comptant même des océans primitifs.



Un explorateur en visite sur Vénus il y a plus de 4 milliards d'années constate l'absence d'océans malgré la présence de vapeur d'eau dans l'atmosphère.

Cette hypothèse devrait être testée par au moins trois missions spatiales dont les lancements sont prévus dans les dix prochaines années par les agences spatiales européenne et étatsunienne (ESA et NASA). Ne souhaitant pas attendre, Martin Turbet et ses collègues ont tenté de répondre à cette même question avec les outils disponibles sur le plancher des vaches.

Planètes en fusion Ils ont d'abord simulé par ordinateur le climat qui devait régner sur Terre et sur Vénus au tout début de leur évolution, il y a plus de 4 milliards d'années, lorsque la surface des planètes était encore en fusion. L'eau y était présente mais, en raison de la température élevée, sous forme de vapeur, comme dans une gigantesque cocotte-minute. Ensuite, à l'aide de modèles tridimensionnels de l'atmosphère, semblables à ceux utilisés pour simuler le climat actuel de la Terre, l'équipe a étudié l'évolution de l'atmosphère des deux planètes

au fil du temps et la possibilité que des océans aient pu se former au cours de ce processus.

Les simulations ont montré que les conditions climatiques n'ont pas permis la condensation de la vapeur d'eau de l'atmosphère de Vénus. Les températures ne sont en effet jamais descendues assez bas pour que l'eau présente dans son atmosphère forme des gouttes de pluie qui auraient pu tomber sur sa surface. Cela s'expliquerait, selon les auteurs de l'article, par le fait que les nuages se forment préférentiellement du côté nuit de la planète, créant un formidable effet de serre qui a empêché Vénus de se refroidir aussi rapidement qu'on le pensait.

Un sort différent Étonnamment, les simulations des astrophysiciennes genevoises montrent également que la Terre aurait bien pu subir le même sort que sa voisine. Si notre planète avait été juste un peu plus proche du Soleil – ou si le Soleil avait brillé aussi fort il y a quelques milliards d'années qu'aujourd'hui –, elle n'aurait pas pu se refroidir suffisamment pour que

l'eau se condense et que les océans se forment. Ironiquement, l'hypothèse selon laquelle le rayonnement solaire ait pu être nettement plus faible dans le passé lointain qu'aujourd'hui était jusqu'à présent perçue comme un obstacle à la vie. Selon les spécialistes, cette caractéristique aurait eu comme résultat de transformer la Terre en une boule de glace hostile. Or il s'avère aujourd'hui que dans le cas d'une jeune Terre très chaude, un Soleil faible représente au contraire une opportunité inespérée.

Les auteures de l'étude, dont font également partie Émilie Bolmont et David Ehrenreich, professeure assistante et professeur associé au Département d'astronomie (Faculté des sciences), précisent toutefois que leurs résultats sont basés sur des modèles théoriques qui ne permettent pas de trancher la question des océans sur Vénus de manière définitive. Les observations des trois missions vénusiennes seront donc indispensables pour confirmer ou infirmer leurs travaux.



BIOCINÉTIQUE

DE LA TROMPE DE L'ÉLÉPHANT SORTIRA LE ROBOT DE DEMAIN

UNE ÉTUDE EST PARVENUE À DÉCORTIQUER LE COMPORTEMENT DE L'APPENDICE NASAL DU PACHYDERME EN **UNE VINGTAINÉ DE MOUVEMENTS DE BASE.** UNE AVANCÉE MAJEURE VERS LE DÉVELOPPEMENT D'UN BRAS ROBOTIQUE SOUPLE.

La souplesse, la flexibilité et la polyvalence de la trompe de l'éléphant représentent sans doute une sorte de graal pour les concepteurs de robots. Pas un os dans l'appendice nasal du pachyderme. Que du muscle et du tendon enveloppés dans une peau épaisse dont la courbure, la torsion et la déformation permettent aussi bien de saisir délicatement une fleur que de soulever une masse de 270 kilogrammes. Dans un article paru le 23 août dans la revue *Current Biology*, l'équipe de Michel Milinkovitch, professeur au Département de génétique et évolution (Faculté des sciences), a réussi, grâce à des technologies de capture de mouvements, à décortiquer les trajectoires complexes de la trompe de l'éléphant et à montrer qu'elles découlent de la combinaison d'une vingtaine de mouvements de base tels que la propagation d'une courbure, la succion ou encore la formation de pseudo-articulations. Cette avancée pourrait servir au développement d'un bras robotique souple aux usages multiples (*lire encadré ci-contre*).

Liberté infinie La trompe de l'éléphant est flexible sur toute sa longueur. La contraction coordonnée des six groupes de muscles qui la traversent et l'animent se traduit par des torsions, des flexions, des allongements, des raccourcissements et des raideurs. En théorie, ce membre, dont la cinématique repose sur l'incompressibilité des tissus autoportants qui le composent, possède un nombre infini de degrés de liberté. L'évolution des éléphants a toutefois permis le développement de stratégies réduisant la complexité biomécanique de leur trompe.

Pour les découvrir, l'équipe de scientifiques s'est rendue en Afrique du Sud en mars 2020 afin d'y mener des expériences sur deux éléphants d'une vingtaine d'années appartenant au centre de conservation de la faune « Adventures with Elephants » dans la province de Limpopo.

Les biologistes ont placé des marqueurs réfléchissants le long de la trompe des deux animaux avant d'enregistrer avec une grande précision leurs trajectoires en 3D à l'aide

Pour atteindre une cible sur le côté, l'éléphant peut former avec sa trompe des segments rigides reliés par des pseudo-articulations, analogues à un coude et un poignet dans un squelette articulé.

d'une dizaine de caméras infrarouges placées autour de la scène – une technologie empruntée à l'industrie cinématographique qui a notamment donné vie aux personnages de Gollum dans *Le Seigneur des Anneaux* ou des Na'vis dans *Avatar*. Les deux pachydermes avaient pour mission de prendre et de déplacer une multitude d'objets de forme, taille et poids variables.

L'analyse des données a montré que les éléphants combinent une vingtaine de mouvements de base simples pour produire tous les comportements complexes dont ils sont capables avec leur trompe.

«Lorsqu'elle saisit et maintient un objet pour le transporter, la trompe présente une flexion localisée qui voyage ensuite de son extrémité vers sa base, explique Paule Dagenais, chercheuse au Département de génétique et évolution (Faculté des sciences). Mais quand l'éléphant atteint une cible placée devant lui, il allonge et rétracte des parties spécifiques de sa trompe de manière modulaire. Par ailleurs, un même mouvement peut remplir des fonctions différentes. Lorsqu'il saisit un disque en bois léger, par exemple, l'animal utilise la succion comme force de levage. Cette même technique est utilisée pour sécuriser la position lorsqu'il s'empare d'un disque plus lourd.»

Pseudo-coude L'éléphant a même développé une stratégie de préhension très particulière lorsqu'il désire atteindre une cible placée sur le côté. Sa trompe forme alors des segments rigides connectés par des articulations virtuelles donnant momentanément l'impression d'un coude et d'un poignet.

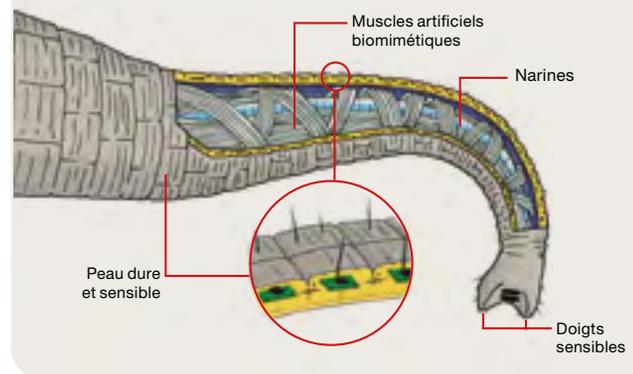
«Nous avons également découvert que le ralentissement de la trompe lorsqu'elle suit une courbe peut être prédit précisément sur la base de la courbure locale de cette trajectoire, poursuit Michel Milinkovitch. Ce qui est remarquable, c'est que cette relation mathématique existe également pour la main humaine lorsqu'elle dessine.»

Pour parachever le travail, les chercheurs et les chercheuses ont réalisé des images d'une précision inédite de l'intérieur de trompes d'éléphants d'Asie et d'Afrique à l'aide de la tomographie par ordinateur, de l'imagerie par résonance magnétique et de coupes en série. Ces informations anatomiques combinées aux résultats comportementaux et cinématiques ont permis aux scientifiques d'établir un lien étroit entre le système musculaire de la trompe et ses fonctions biomécaniques.

Anton Vos

LA QUÊTE D'UN ROBOT SOUPLE

CONCEPT DE «ROBOT SOUPLE», INSPIRÉ PAR LA TROMPE D'ÉLÉPHANT



L'étude sur les mouvements de la trompe des éléphants, publiée dans la revue *Current Biology* par l'équipe de Michel Milinkovitch, professeur au Département de génétique et évolution (Faculté des sciences), a été soutenue par le projet européen Proboscis dont l'objectif est précisément le développement de « robots souples ».

«Les robots classiques sont extrêmement bons pour effectuer une tâche spécifique pour laquelle ils ont été conçus, note Michel Milinkovitch qui représente l'Université de Genève dans le consortium Proboscis. Mais si vous voulez que ce robot fasse quelque chose d'un peu différent, il échouera lamentablement. Certains organismes vivants, eux, ont été optimisés pour la polyvalence. Le contrôle de la partie de la trompe qui se contracte est très fin. Ce n'est pas l'ensemble de la trompe qui s'allonge et se raccourcit – ce sont des portions, en fonction de ce que fait l'éléphant. Cela pourrait représenter un nouveau paradigme en robotique : à la place de segments métalliques reliés par des articulations, on pourrait utiliser des matériaux flexibles.»

Copier l'anatomie naturelle de l'appendice nasal des éléphants

est probablement impossible mais il est envisageable de s'en inspirer pour tenter de recréer sa polyvalence dans les mouvements. Lucia Beccai, chercheuse à l'Istituto italiano di tecnologia et coordinatrice de Proboscis, affirme même sur *CNN* qu'un prototype fonctionnel devrait voir le jour d'ici environ un an.

«Les résultats de l'étude sont exceptionnels, mais il s'agit maintenant de traduire ces données biologiques en spécifications techniques qui ne doivent pas nécessairement copier l'organe naturel, souligne-t-elle. Nous devons extraire certains principes simplificateurs qui peuvent rendre le comportement suffisamment simple pour être efficace, adaptable aux changements et efficient.»

Si cela fonctionne, ce robot souple composé de matériaux et de technologies nouveaux pourrait à la fois gérer des charges lourdes et légères, ce qui, d'un point de vue industriel, représente un énorme avantage. Un tel appareil pourrait servir sur des chaînes de production d'usines, être utilisé pour des opérations de recherche et de sauvetage et même dans le domaine de la santé pour soulever et aider les personnes âgées ou malades.

DROGUES

LA SÉROTONINE FREINE L'ADDICTION À LA COCAÏNE

SI SEULEMENT UN CONSOMMATEUR RÉGULIER DE COCAÏNE SUR CINQ **SUCCOMBE À L'ADDICTION**, C'EST PARCE QU'UN NEUROTRANSMETTEUR, LA SÉROTONINE, JOUE UN RÔLE QUI CONTRE CELUI D'UN AUTRE, LA DOPAMINE. UNE ÉTUDE EXPLIQUE LE MÉCANISME MIS EN ŒUVRE.

Environ 20% des usagers et usagers chroniques de drogues tombent dans l'addiction (définie comme une consommation compulsive de la substance psychotrope malgré les effets négatifs qui l'accompagnent). Cela signifie tout de même que les 80% restants sont capables d'en prendre régulièrement sans pour autant perdre le contrôle. Bien que souvent ignorés du grand public, ces chiffres sont familiers des scientifiques. Ce qui toutefois demeure méconnu, ce sont les mécanismes cellulaires qui pourraient expliquer cette différence entre individus. Dans un article paru dans la revue *Science* du 10 septembre, l'équipe de Christian Lüscher, professeur au Département des neurosciences fondamentales (Faculté de médecine), lève un petit coin du voile en rapportant comment la sérotonine – un neurotransmetteur antagoniste à la dopamine – parvient à freiner la survenue de l'addiction lors de la consommation de cocaïne.

«L'objectif final de notre recherche est d'identifier les individus susceptibles de développer une addiction avant même qu'ils ne commencent à consommer des stupéfiants, explique Christian Lüscher. Mais pour atteindre ce but, nous devons passer par plusieurs étapes intermédiaires. La première consiste évidemment à identifier les circuits du cerveau impliqués dans ce phénomène. Et ça, nous l'avons fait il y a trois ans.»

Dans un article publié dans la revue *Nature* du 19 décembre 2018, l'équipe du chercheur genevois montre en effet, chez les souris, que le comportement addictif est associé à la stimulation de circuits neuronaux situés dans le cortex orbito-frontal (COF) et se projetant

vers une autre zone cérébrale plus profonde appelée le striatum dorsal (SD). En d'autres termes, ce qui entraîne l'addiction chez une portion importante d'individus, ce n'est pas une question de mort neuronale – comme on l'a cru longtemps – mais un remodelage de certains circuits et en particulier un renforcement de la voie neuronale spécifique COF-SD, une voie qui fait partie intégrante du circuit plus vaste dit de la récompense.

UNE DROGUE À LA CAPACITÉ DE BIAISER LA PRISE DE DÉCISION ET DE FORCER LE CORTEX ORBITO-FRONTAL À FAIRE LE « MAUVAIS CHOIX »

Il se trouve également que le cortex orbito-frontal est le siège de la prise de décision, là où sont évalués le pour et le contre lorsqu'on est confronté à un dilemme. Le modèle neurologique de l'addiction proposé par Christian Lüscher et ses collègues permet ainsi d'argumenter qu'en modifiant les connexions nerveuses dans cette région précise, une drogue a la capacité de biaiser cette prise de

décision et de forcer à faire le « mauvais choix ». Le cerveau, modifié par l'usage de substances psychotropes, donnerait alors une importance démesurée à la récompense escomptée au détriment des inévitables effets négatifs qui, en comparaison, ne font plus le poids.

Une addiction modulable La théorie est cohérente mais le hic, c'est que le risque de déclencher une consommation compulsive diffère non seulement d'un individu à l'autre mais aussi d'une substance à l'autre. En effet, si le taux de personnes qui deviennent accros à la cocaïne est estimé à 20%, ce chiffre monte à 30% dans le cas des opiacés comme l'héroïne. Par ailleurs, quasiment tous les adultes en Suisse consomment au moins occasionnellement un autre stimulateur du système de récompense bien connu qui est l'alcool. Toutefois, seul un petit pourcentage d'entre eux est alcoolique.

Chez les souris, cette proportion change encore lorsqu'on stimule directement les neurones produisant de la dopamine (le neurotransmetteur qui active le circuit de la récompense et provoque un sentiment de plaisir) sans passer par l'ingestion ou l'injection de la moindre substance psychotrope. Mis au point par l'équipe de Christian Lüscher il y a plusieurs années, ce dispositif permet aux rongeurs de s'administrer des « doses virtuelles » à volonté en appuyant sur un levier. Pour simuler les effets néfastes de la consommation de drogue,



ISTOCK

INTERFÉRENCES SUR LE CIRCUIT DE LA RÉCOMPENSE

Le circuit de la récompense est un circuit neuronal fondamental dans la biologie de la plupart des animaux vertébrés. C'est en effet grâce à lui que l'humain, par exemple, ressent du plaisir et trouve la motivation à renouveler les expériences perçues comme agréables et essentielles à sa survie que sont l'assouvissement de la faim et de la soif, la sexualité, l'attention parentale, etc. Ce circuit assez complexe et non encore totalement élucidé implique plusieurs aires cérébrales, aussi bien dans le cortex frontal que dans les régions plus profondes comme l'aire tegmentale ventrale ou le striatum dorsal. Il fonctionne aussi par le biais de plusieurs neurotransmetteurs dont le plus

important est la bien nommée dopamine mais auquel il faut désormais aussi ajouter au moins la sérotonine.

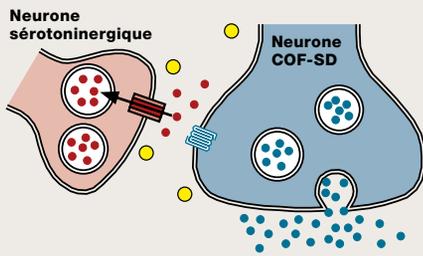
Si les substances psychotropes ont un tel succès dans la société, c'est parce qu'elles actionnent artificiellement ce circuit de la récompense. Elles ont cependant la fâcheuse tendance à provoquer une addiction chez un certain nombre de personnes, c'est-à-dire une consommation qui échappe à tout contrôle et devient compulsive (à distinguer de la dépendance, définie comme la survenue d'un symptôme de sevrage à l'arrêt brusque d'une consommation et qui touche tout le monde). Les travaux de l'équipe de Christian Lüscher, professeur au

Département des neurosciences fondamentales (Faculté de médecine), ont permis de localiser les sous-circuits impliqués dans le phénomène de l'addiction et de comprendre certains mécanismes qui permettent de le moduler. La poursuite des recherches dans cette direction pourrait aboutir à la découverte des causes expliquant les différences individuelles dans ce domaine et permettre d'identifier précocement les personnes vulnérables ou de trouver des moyens pour traiter les toxicomanies. Il est également possible – la question est ouverte – que les circuits et les mécanismes neuronaux impliqués dans l'addiction aux psychotropes

soient les mêmes ou qu'ils soient similaires à ceux qui provoquent d'autres troubles compulsifs tels que les TOC (troubles obsessionnels compulsifs), les troubles de l'alimentation, etc. Dans cette optique, Christian Lüscher et ses collègues ont d'ailleurs mis au point des protocoles d'expériences permettant de mesurer la manière dont des comportements plus naturels comme l'assouvissement de la faim agissent sur le circuit de la récompense. L'équipe a notamment identifié un circuit qui contrôle la prise de nourriture hédonique et dont le dysfonctionnement pourrait contribuer aux troubles alimentaires.

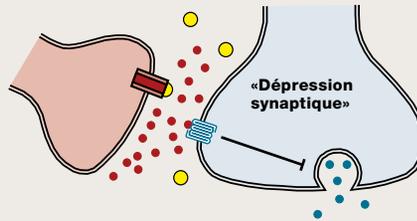
SCHÉMA DE LA MODULATION DE L'ADDICTION PAR LA SÉROTONINE

● Sérotonine ● Glutamate ● Cocaïne 5-HTR1B SERT



SOURIS GÉNÉTIQUEMENT MODIFIÉE

- > La **cocaïne** ne peut pas bloquer les récepteurs **SERT**.
- > La **sérotonine** est recapturée via les **SERT**, laissant les récepteurs **5-HTR1B** libres.
- > Stimulés par la dopamine, les neurones **COF-SD** sont actifs (production de **glutamate**).
- Le risque d'addiction est élevé.



SOURIS NORMALE

- > La **cocaïne** bloque les récepteurs **SERT**.
- > La **sérotonine** n'est plus recapturée. Elle bloque les **5-HTR1B**.
- > L'activité de la voie **COF-SD**, impliquée dans l'addiction, diminue.
- Le risque d'addiction diminue.



SCIENCE

les souris reçoivent à chaque «shoot» un léger stimulus désagréable sous la forme d'un choc électrique ou d'un jet d'air. Cela suffit à éloigner certaines du levier à plaisir. Alors que pour d'autres, la contrainte ne semble même pas exister. Résultat : dans ce cas de figure particulier, plus de 50% des souris succombent à l'addiction – contre seulement 20% lorsqu'elles s'autoadministrent de la cocaïne tout en subissant les mêmes stimuli désagréables.

«L'objectif de notre dernière étude – qui contribue à la deuxième étape de notre recherche au long cours – consiste précisément à comprendre pourquoi il existe une telle différence entre ces deux façons de se droguer», précise Yue Li, chercheuse au Département de neurosciences fondamentales (Faculté de médecine) et auteure principale de l'étude. On savait que la cocaïne bloquait les récepteurs de la dopamine, provoquant ainsi une augmentation de la concentration du neurotransmetteur dans le milieu intercellulaire et, par conséquent, la stimulation du circuit de la récompense. On savait également que cette drogue bloquait aussi les récepteurs de la

sérotonine, un autre neurotransmetteur jouant un rôle antagoniste à la dopamine. Ce que nous montrons dans notre travail, c'est le mécanisme par lequel la sérotonine module – partiellement – l'effet de la dopamine.»

«**Dépression synaptique**» Grâce à plusieurs expériences sur des souris génétiquement modifiées, les scientifiques genevois ont réussi à reconstituer le scénario suivant : une fois ingérée, la cocaïne bloque le transporteur de la sérotonine (SERT), ce qui empêche sa recapture (voir infographie ci-contre). Du coup, la concentration du neurotransmetteur augmente dans le milieu intercellulaire. La sérotonine commence alors à se lier à un autre type de récepteurs (5-HT1B), localisés à la surface d'autres neurones qui sont précisément ceux qui relient le cortex orbito-frontal au striatum dorsal, c'est-à-dire ceux qui forment le circuit COF-SD impliqué dans l'apparition de l'addiction.

L'activation de ce récepteur par la sérotonine a comme résultat une «dépression synaptique»

le long de cette voie neuronale, ce qui diminue significativement son activité. Conséquence logique : le nombre de souris succombant à un comportement compulsif baisse.

Plus concrètement, d'après les résultats publiés, 56% des souris génétiquement modifiées de manière à ce que les transporteurs SERT ne soient pas bloqués par la cocaïne ont développé un comportement compulsif face à la cocaïne. Les rongeurs sauvages – ou sains – n'étaient que 12% à connaître le même destin. Dans une expérience parallèle, 57% des souris dépourvues de récepteurs 5-HT1B ont succombé à l'addiction à la «drogue sans substance». Dans ce cas précis, en rétablissant le niveau de sérotonine dans le cerveau par voie médicamenteuse, le taux de rongeurs compulsifs est retombé en dessous des 20%.

«La sérotonine joue le rôle de modulateur dans l'évolution vers un comportement compulsif», résume Christian Lüscher. Elle le fait via des mécanismes synaptiques clés qui sont cohérents avec le modèle du circuit de l'addiction que nous avons proposé. Notre travail peut contribuer à surmonter les limites et les résultats divergents d'études pilotes qui sont menées actuellement sur les toxicomanes humains et qui tentent de mesurer l'efficacité des bloqueurs de la recapture de la sérotonine ou de l'utilisation empirique d'hallucinogènes. Cela dit, et c'est la dernière étape de notre recherche, il nous faut encore déterminer ce qui fait que chez certains individus ce frein à l'addiction fonctionne mieux que chez d'autres. Nous avons déjà commencé nos recherches. Mais cela va nous demander encore plusieurs années de travail.»

Anton Vos

MONDIALISATION

LES CHAÎNES MONDIALES DE VALEUR: UN MODÈLE PAS SI VERTUEUX

EN S'APPUYANT SUR L'ÉTUDE DE DEUX ENTREPRISES SUISSES ACTIVES DANS LE DOMAINE DES MACHINES-OUTILS, ARIS MARTINELLI DÉMONTRE QUE LES GRANDS GROUPES FONCTIONNANT EN RÉSEAUX ISSUS DE LA MONDIALISATION SERVENT SURTOUT CEUX QUI LES DIRIGENT ET QU'ILS CONDUISENT À **UNE DÉGRADATION GLOBALE DES CONDITIONS DE TRAVAIL** DE LEURS SALARIÉES

Archive ouverte N°152779

Dans un livre publié à la toute fin du XX^e siècle, l'essayiste français Alain Minc défendait la perspective d'une mondialisation potentiellement « heureuse ». Selon lui, la libéralisation des échanges et du commerce mondial se devait de déboucher sur une situation « gagnant-gagnant ». En accédant à une main-d'œuvre bon marché, les pays occidentaux industrialisés verraient leurs profits grandir et, par là même, le pouvoir d'achat de leurs ressortissants augmenter. En devenant l'atelier des pays riches, les pays dits « émergents » assureraient, quant à eux, à leurs populations de nouvelles sources de revenus ainsi qu'un pouvoir d'achat qu'elles n'avaient jamais connu jusque-là. Sans parler du transfert de connaissances, de l'ouverture des marchés ou encore de l'intégration aux réseaux de distribution.

Cette vision quelque peu angélique, que la Banque mondiale a largement fait sienne, a depuis été battue en brèche par de nombreux experts et dénoncée par les mouvements sociaux. Tous observant que si les pays riches avaient effectivement bénéficié de cette nouvelle configuration, la situation des États moins bien nantis avait plutôt eu tendance à se péjorer. Ce qui ne l'empêche pas de ressurgir régulièrement lorsqu'il s'agit d'évaluer la pertinence des modèles économiques issus de la mondialisation.

Dans le cadre de la thèse qu'il a réalisée au sein de l'Institut de démographie et socio-économie de la Faculté des sciences de la

société, et qu'il a soutenue en juin dernier, Aris Martinelli a cherché à savoir ce qu'il en était dans un pays aussi prospère que la Suisse. Et les conclusions de son travail montrent que, là aussi, les effets pervers l'emportent nettement sur les bénéfices en matière de performance, d'emploi et de conditions de travail. Explications.

« La question m'intéressait d'un point de vue strictement scientifique, explique le chercheur. Mais aussi parce que dans le milieu dont je suis issu, qui est proche du monde ouvrier, j'entendais sans cesse les gens se plaindre des méfaits de la mondialisation sur leurs conditions de travail. J'ai donc cherché à savoir comment ces dynamiques globales affectaient effectivement la vie des entreprises et de leurs salariés. »

Pour faire la lumière sur la question, Aris Martinelli a opté pour une analyse qualitative portant sur deux entreprises helvétiques – ainsi qu'une partie de leurs clients, fournisseurs et sous-traitants – insérées dans ce que les spécialistes appellent des chaînes mondiales de valeur, soit des organisations industrielles caractérisées par l'éclatement du processus de production en plusieurs phases et par le recours à des sous-traitants qui peuvent être localisés à l'autre bout de la planète, à l'image d'Apple, par exemple.

« L'idée générale d'une chaîne mondiale de valeur est que différentes firmes de divers pays participent à la conception, la fabrication et la vente d'un produit en y ajoutant une part de valeur ajoutée à chaque étape, précise Aris Martinelli. Ce modèle, qui est devenu dominant depuis la fin

des années 1990 et qui représente aujourd'hui plus de la moitié des échanges mondiaux, ne repose plus sur une organisation verticale, comme le modèle fordiste, mais sur un réseau d'entreprises subordonnées à une maison mère dont le leadership est assuré par le contrôle des biens intangibles comme les licences, les logiciels, les outils de gestion ou le savoir-faire technique.»

Anonymisée et rebaptisée «TI Company» pour les besoins de l'étude, la première entreprise étudiée dans le cadre de ce travail est une PME familiale internationalisée qui assume une double fonction. D'une part, celle de fournisseur de produits dans le domaine des turbines à gaz pour le compte d'une grande multinationale américaine. De l'autre, celle de commanditaire dans la fabrication de wagons destinés au transport de marchandises, activité dans le cadre de laquelle TI Company est en relation avec plusieurs entreprises à qui elle sous-traite une partie de la production.

Dissimulée sous l'appellation «G Company», la seconde est une filiale d'une multinationale suisse qui occupe la position de leader mondial dans la fabrication de machines-outils. Victime de plusieurs restructurations et de vagues de licenciements successives, elle a abandonné une partie de ses activités productives traditionnelles (fonderie et tuyauterie), qui ont été en partie délocalisées à Taïwan, pour se concentrer sur la fabrication de composants à haute valeur ajoutée.

Basés sur une analyse documentaire, une étude macroéconomique du secteur et une soixantaine d'entretiens approfondis menés tant auprès du management que des salarié-es, des associations patronales et des syndicats, les résultats obtenus par Aris Martinelli permettent de relever quelques points positifs.

Dans un premier temps, en effet, lorsque la chaîne mondiale de valeur (CMV) est en phase de développement, les relations entre l'entreprise leader et ses subordonnées sont relativement vertueuses. Même si des tensions existent, globalement le climat est à la confiance mutuelle, à l'échange de connaissances et de bonnes pratiques. Du

côté des salarié-es, l'intégration à un grand groupe international peut contribuer à donner davantage de sens au travail à accomplir, voire susciter une certaine fierté. La possibilité de se former et d'accéder à de nouvelles tâches entraîne par ailleurs une rupture de la monotonie.

Mais la lune de miel ne dure pas indéfiniment. Une fois que la machine est rodée, que chacun des partenaires a fait la preuve de ses compétences, le ton se durcit et la réalité reprend ses droits. Le but premier d'une CMV étant, in fine, de valoriser le capital des firmes qui la contrôlent.

«Après plusieurs années d'investissements à perte, il y a une exigence de profit, la volonté de s'imposer sur le marché, détaille le chercheur. Et dès lors que les savoir-faire des sous-traitants ont été assimilés, l'apprentissage se renverse. C'est au tour de l'entreprise leader de capter les connaissances. D'une relation de gouvernance relationnelle, on passe donc à une relation captive et directive selon une stratégie qui repose sur un double objectif.»

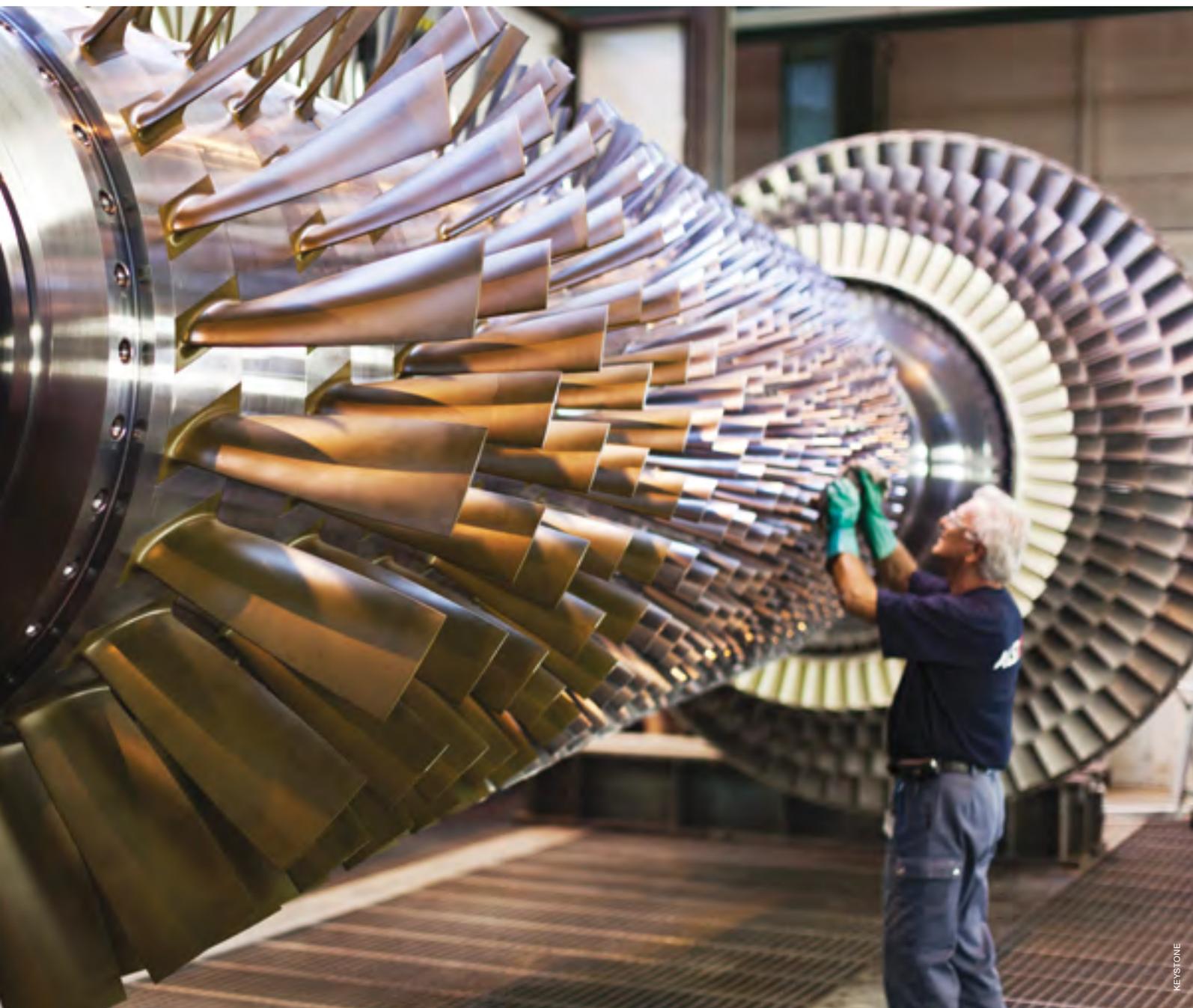
Le premier vise à s'assurer la mainmise sur les segments à haute valeur ajoutée qui permettent de garder le contrôle sur l'ensemble du dispositif, comme l'innovation et le développement, l'expertise organisationnelle, les logiciels de gestion ou encore les composants software qui pilotent les machines de production. Un recentrage qui implique des restructurations au sein de l'entreprise leader – et donc de potentielles suppressions de postes – ainsi qu'une modification du cahier des charges des employés (personnel technique et ingénieurs en tête) qui consacrent de moins et moins de temps aux tâches de développement et de plus en plus de temps à celles liées à la gestion et au contrôle.

Le second objectif consiste en effet à placer les entreprises subordonnées dans une situation de dépendance croissante afin de réduire au minimum les coûts de production.

Processus de vampirisation Ce processus de vampirisation se concrétise notamment par une négociation à la baisse des prix de



L'industrie des machines, des équipements électriques et des métaux (MEM) occupe plus de 320'000 personnes en Suisse et constitue la première branche exportatrice du pays.



KEystone

commande auprès des fournisseurs, qui se voient désormais mis en concurrence directe avec l'injonction de faire mieux pour moins cher, ce qui entraîne une forme de défiance vis-à-vis des autres membres du groupe et entrave la mise en place de réelles synergies. Il peut par ailleurs s'accompagner de la mise en place d'un système de contrôle qualité scrupuleux qui conduit à une responsabilisation accrue du sous-traitant. Celui-ci devient, de facto, le garant ultime de la qualité des produits livrés. Comme le montre Aris Martinelli, la firme leader peut en outre allonger les délais de paiement et introduire un système de facturation basé sur des remises afin de resserrer encore un peu plus son étreinte sur ses partenaires. Chez le sous-traitant, ces exigences se traduisent par une complexification et une

intensification du travail qui augmente la pression sur les collaborateurs. À cela s'ajoute un sentiment croissant de précarité lié à l'impression de ne plus maîtriser l'avenir et à la crainte de voir son emploi disparaître du jour au lendemain.

L'ensemble de ces pratiques génère une souffrance qui, comme le relèvent les entretiens menés par Aris Martinelli, se manifeste au quotidien dans la vie des employés. Poussés par leur « ethos professionnel », ceux-ci ont tendance à se surinvestir dans leur travail.

« Les stratégies de profit que je décris dans ma thèse impliquent une diminution des effectifs dans les firmes leaders, une précarisation du travail (chômage technique, suppression des primes, etc.), ainsi que la recherche d'une main-d'œuvre à bas coût et docile dans les firmes subordonnées, résume

le chercheur. L'effet général de cette dynamique est donc un éclatement des collectifs de travail ainsi qu'un recul de la conflictualité collective et de la solidarité parmi les travailleurs et travailleuses. Cette logique de prédation me semble pouvoir être reliée au retour d'une forme de capitalisme de monopole avec de grands acteurs qui concentrent toujours plus de richesses et de moyens de production. Mais elle porte en elle une contradiction intrinsèque dans la mesure où ces grandes entreprises ont besoin de partenaires pour assurer leur développement tout en se sentant contraintes de les phagocytter pour maximiser leurs profits. »

Vincent Monnet

LA FORCE QUANTIQU



UE

LES TECHNOLOGIES QUANTIQUES, EXPLOITANT LES PROPRIÉTÉS DÉROUTANTES DES PARTICULES ET DES ATOMES, BÉNÉFICIENT D'INVESTISSEMENTS QUI SE COMPTENT EN MILLIARDS D'EUROS. LES PHYSIENNES ET PHYSIENS SUISSES SONT À LA POINTE MONDIALE DANS CE DOMAINE ALLIANT CRYPTOGRAPHIE, ORDINATEURS, SENSEURS ET MATÉRIAUX QUANTIQUES.

La physique quantique est une théorie déroutante. Visibles en principe uniquement à toute petite échelle, ses propriétés sont profondément contre-intuitives. Les spécialistes du domaine parlent en effet sans sourciller (ni sourire) de téléportation, d'intrication, de non-localité et d'autres superpositions et interférences quantiques. Autant de phénomènes qui n'ont aucun équivalent dans le monde classique si ce n'est dans les livres de science-fiction ou, peut-être, de magie. Ces concepts, bien réels, sont pourtant à la base de ce que d'aucuns appellent déjà une révolution technologique susceptible de bouleverser des pans importants de notre société, à commencer par ceux de la communication et de l'informatique.

Signe qui ne trompe pas, les grandes puissances – États-Unis et Chine en tête – suivies de près par les compagnies géantes telles que Google, IBM, Microsoft ou encore Amazon, injectent des milliards de dollars dans ce secteur afin d'être parmi les premiers à développer un ordinateur quantique, à la puissance de calcul décuplée, ou un système de cryptographie quantique réputé absolument inviolable. L'Union européenne (UE) n'est pas en reste avec notamment le Flagship quantique, un mégaprojet d'un milliard d'euros sur dix ans, censé affirmer le leadership du continent dans ce secteur. Certains pays membres jouent également la partie en mode individuel et font monter les enchères encore plus haut. La France a ainsi promis en janvier 2021 un budget de 1,8 milliard d'euros sur cinq ans pour les technologies quantiques. L'Allemagne a annoncé en mai le

déblocage de 2 milliards d'euros pour construire un ordinateur quantique d'ici à 2025. Quant au Royaume-Uni, il affirme avoir dépassé le milliard de livres d'investissements cumulés dans les technologies quantiques.

Tout porte cependant à croire que dans cette course, la Suisse devra jouer en solo. La Commission européenne a en effet décidé ce printemps que la recherche dans les technologies quantiques était désormais stratégique, à l'image du domaine spatial. En d'autres termes, les projets et les financements dans ces disciplines doivent être réservés aux seules équipes issues des pays membres de l'UE.

Pour ne rien arranger, le Conseil fédéral a, au mois de mai, abandonné l'accord-cadre avec l'UE. Ce geste a eu pour effet de reléguer le statut de la Suisse à celui de pays tiers non associé à Horizon Europe, le 9^e programme-cadre de recherche et d'innovation de l'UE (dont le budget est

estimé à 95 milliards d'euros pour la période 2021-2027). Même si elle est contournable via des financements directs assurés par la Confédération, cette évolution ne fait qu'isoler davantage les « quantiques » suisses.

Les conséquences ne se sont pas fait attendre : les physiciens et les physiciennes suisses ont d'abord vu se fermer cette année les portes de l'European Quantum Communication Infrastructure (EuroQCI), un programme d'envergure visant à développer une structure de communication quantique à l'échelle du continent. Ils et elles ont ensuite été exclu-es officiellement du Flagship quantique, auquel des chercheurs genevois participent pourtant depuis trois ans. La Suisse, et Genève en particulier, a pourtant de sérieux atouts à faire valoir en la matière. Un livre blanc, *Les technologies quantiques en Suisse, réflexions et recommandations du Conseil suisse de la science (CSS)*, réalisé de manière un peu prémonitoire en 2020 à l'adresse du Conseil fédéral,

en fait l'inventaire (*lire aussi l'encadré ci-contre*). L'Université de Genève, par exemple, est à la pointe en cryptographie quantique, en matériaux quantiques et en simulations quantiques. L'École polytechnique fédérale de Zurich (ETHZ), l'Institut Paul Scherrer et l'Université de Bâle sont actifs dans le domaine des ordinateurs quantiques et des senseurs quantiques, tandis que l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) se distingue dans celui des senseurs et « logiciels quantiques ». Tour d'horizon avec Nicolas Brunner, professeur au Département de physique appliquée (Faculté des sciences).

LA COMMISSION EUROPÉENNE A DÉCIDÉ CE PRINTEMPS QUE LA RECHERCHE DANS LES TECHNOLOGIES QUANTIQUES ÉTAIT DÉSORMAIS STRATÉGIQUE

Campus : Tout le monde parle de révolution quantique. De quoi s'agit-il exactement ?

Nicolas Brunner : Il s'agit en fait d'une deuxième révolution quantique. La première a eu lieu au milieu du XX^e siècle, avec des découvertes comme le laser et, surtout, le transistor. Celles-ci sont en effet basées sur la théorie de la mécanique quantique qui décrit de manière extraordinairement précise le monde microscopique, soit ce qui se passe à l'échelle des particules, des atomes et des molécules. Développée à l'origine par des scientifiques tels que Max Planck, Albert Einstein, Niels Bohr ou encore Erwin Schrödinger, cette première révolution quantique a en particulier permis de comprendre les propriétés semi-conductrices de certains matériaux. Des propriétés que les physiciens américains John Bardeen, Walter Brattain et William Shockley ont exploitées pour développer en 1947



Nicolas Brunner

Professeur au Département de physique appliquée, Faculté des sciences

Formation : Après un doctorat de physique de l'Université de Genève, il passe cinq ans à l'Université de Bristol, au Royaume-Uni. Il décroche ensuite un poste de professeur boursier, ce qui lui permet de revenir à l'Université de Genève.

Parcours : Nommé professeur associé en 2016, il mène de nombreux projets, dont un prestigieux ERC Starting Grant. Il est un spécialiste mondialement reconnu en information quantique et en non-localité.

« UNE ACTION FANTOMATIQUE À DISTANCE »

LA PHYSIQUE QUANTIQUE PRÉDIT TOUTES SORTES DE PHÉNOMÈNES CONTRE-INTUITIFS, RADICALEMENT DIFFÉRENTS DU MONDE MACROSCOPIQUE QUI NOUS ENTOURE. VISITE GUIDÉE.

DANS TOUS LES ÉTATS À LA FOIS

Une particule peut, selon les lois de la nature qui régissent l'infiniment petit, se trouver dans un état de superposition quantique, c'est-à-dire qu'elle peut se trouver, par exemple, à plusieurs endroits en même temps (ou être polarisée dans toutes les directions à la fois). On parle alors d'un état totalement indéterminé. Ce qui est encore plus surprenant, c'est que lorsqu'un observateur mesure cette particule, celle-ci est « projetée » à un endroit précis, c'est-à-dire qu'elle se retrouve, finalement, dans un état bien déterminé. Une mesure quantique entraîne donc une modification de l'état quantique d'une particule et ce processus est à la fois aléatoire (le résultat relève du parfait hasard) et irréversible (la mesure détruit ou perturbe irrémédiablement le système, en l'occurrence la particule). Bien que la théorie quantique prédise cet effet, elle ne fournit aucune explication. Ce paradoxe est illustré par la fameuse expérience de pensée du « chat de Schrödinger ». Le pauvre animal est enfermé dans une boîte munie d'un dispositif de mise à mort déclenché par la désintégration d'un atome radioactif. Imaginons que l'atome est préparé de telle manière qu'il se trouve dans un état quantique indéterminé, c'est-à-dire qu'il est à la fois intact et désintégré. Du coup, s'il était dans un monde quantique, le chat serait à la fois mort et vivant. Mais lorsqu'on ouvre la boîte (et que l'on mesure le système), on découvre que le chat est mort ou vivant, selon que l'atome se soit désintégré ou pas.

L'INTRICATION

Dans le monde quantique, il est possible de préparer un système de deux particules (ou plus) dans un état quantique dit « intriqué ». Dans ce cas, les deux particules sont intimement liées et se comportent de manière fortement corrélée. En fait, la physique quantique affirme que ces deux particules ne forment qu'un seul et unique système physique. Et cela reste valable même lorsque les deux particules sont séparées par une grande distance. Par conséquent, si on agit sur une des particules, en la mesurant par exemple, l'état quantique de l'autre s'en trouve instantanément

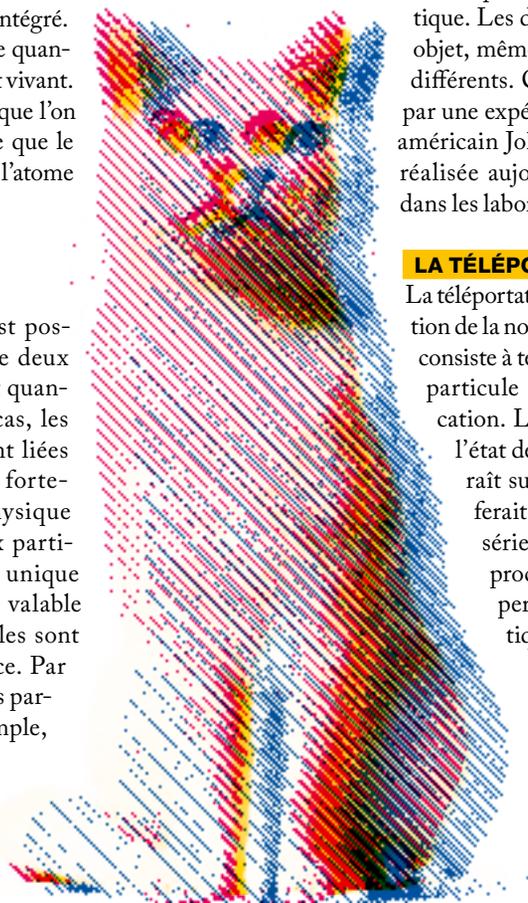
modifié. Albert Einstein, qui a contribué à découvrir cette propriété, l'a qualifiée d'« action fantomatique à distance ». L'intrication quantique est cependant bien réelle. Elle est observée quotidiennement en laboratoire depuis la première expérience qui l'a mise en évidence et qui est due au physicien français Alain Aspect au début des années 1980. Elle représente d'ailleurs la ressource clé pour de nombreuses technologies quantiques.

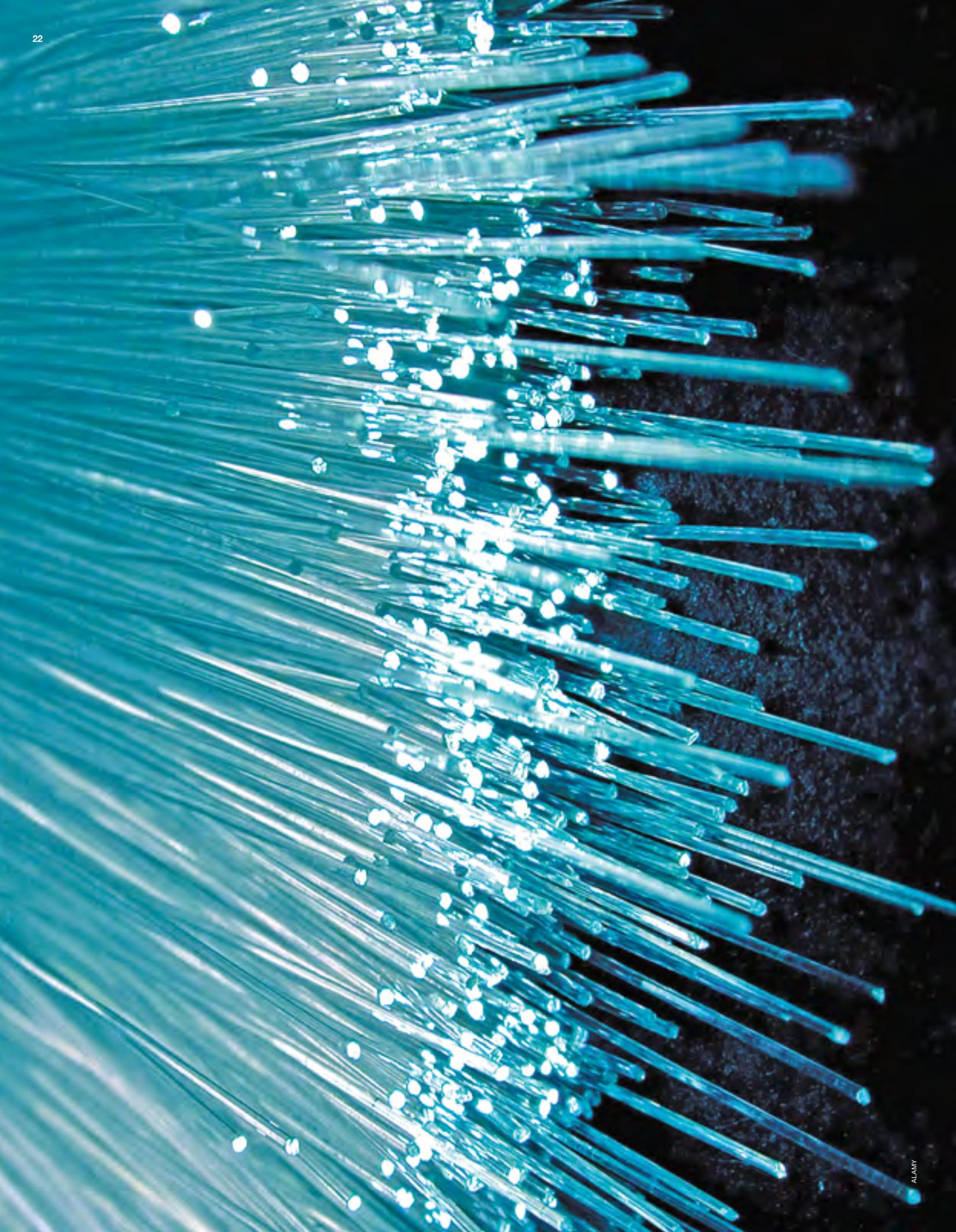
LA NON-LOCALITÉ

Puisque deux particules intriquées forment un seul et même système physique, la mesure de l'une influence immédiatement l'état de l'autre. En pratique, des expériences (menées notamment à Genève) ont pu démontrer que ce phénomène est véritablement instantané. Cette propriété purement quantique ne possède aucun équivalent en physique classique où toute information ou influence se propage de proche en proche et ne peut dépasser la vitesse de la lumière. Dans le cas des deux particules intriquées, les experts préfèrent toutefois renoncer à l'idée d'une influence (ou d'une communication) entre elles. À la place, on parle de non-localité quantique. Les deux particules forment le même objet, même si elles sont à des endroits très différents. Cela peut se vérifier en pratique par une expérience proposée par le physicien américain John Bell dans les années 1960 et réalisée aujourd'hui de manière routinière dans les laboratoires.

LA TÉLÉPORTATION

La téléportation quantique est une manifestation de la non-localité quantique. Le principe consiste à téléporter un état quantique d'une particule à une autre en utilisant l'intrication. Le résultat de l'opération est que l'état de la première disparaît et réapparaît sur la seconde. Un peu comme le ferait le personnage de Spock dans la série *Star Trek* à la différence que le procédé de téléportation quantique permet de téléporter un état quantique mais pas de l'énergie ou de la matière. Les lois de la relativité générale, dont celle qui stipule que rien ne peut dépasser la vitesse de la lumière, sont donc respectées.





Fibres optiques.

le premier transistor, qui est le composant de base de tout appareil électronique. En d'autres termes, sans la physique quantique, nous n'aurions aujourd'hui ni ordinateur, ni téléphone portable, ni télévision, et j'en passe.

Et qu'en est-il de la deuxième révolution ?

Il se trouve qu'en plus de décrire avec une très grande précision la physique des particules et des atomes, la théorie quantique prédit également l'existence de phénomènes contre-intuitifs, tels que l'intrication, la non-localité ou encore la téléportation quantique qui se manifestent à toute petite échelle (*lire aussi encadré en page 21*). Aujourd'hui, on peut non seulement observer ces phénomènes en laboratoire mais aussi les contrôler avec suffisamment de précision afin de les exploiter et de développer des technologies nouvelles qui forment justement le cœur de ce qu'on appelle la deuxième révolution quantique.

Quelles sont ces technologies ?

On peut les regrouper en trois grandes catégories. La première est celle des communications quantiques, avec notamment la cryptographie quantique et la téléportation quantique, des domaines dans lesquels l'Université de Genève est pionnière, notamment grâce aux travaux menés depuis les années 1990 par Nicolas Gisin, professeur honoraire à la Faculté des sciences, et qui ont abouti, entre autres, à la création il y a vingt ans d'ID Quantique, une start-up unique en son genre (*lire aussi en page 34*). On mentionnera ensuite les senseurs quantiques et, bien sûr, l'ordinateur quantique.

Qu'est-ce que la cryptographie quantique ?

La cryptographie est l'art d'envoyer des messages secrets. En exploitant les propriétés quantiques des photons (les particules de lumière), la cryptographie quantique permet la transmission d'informations de manière parfaitement sécurisée et donc, en principe, inviolable. L'idée est d'établir une clé de codage secrète entre deux protagonistes distants, communément appelés Alice et Bob. Alice crée des paires de photons intriqués (ils sont corrélés au point de représenter un seul et même objet), dont elle envoie un des membres à Bob qui les mesure au fur et à mesure qu'ils arrivent. En vérifiant l'intégrité des propriétés quantiques de cette transmission, les deux interlocuteurs peuvent garantir la confidentialité de la clé. En d'autres termes, pour obtenir de l'information sur cette clé, un potentiel espion perturberait forcément le phénomène d'intrication et se révélerait. Aujourd'hui, la cryptographie quantique permet déjà de sécuriser des communications sur quelques centaines de kilomètres. Pour aller au-delà, il

« LA SUISSE A LES MOYENS DE CRÉER UN RÉSEAU DE COMMUNICATION QUANTIQUE À L'ÉCHELLE NATIONALE »

faudrait pouvoir s'appuyer sur des relais quantiques. C'est un domaine sur lequel nous travaillons depuis plusieurs années. Des expériences de faisabilité ont été réalisées mais le système n'est pas encore suffisamment performant pour être utilisé en pratique.

Qui peut être intéressé par un réseau de communication pareillement sécurisé ?

En Suisse, on peut citer toutes les infrastructures pour lesquelles la sécurité des données et des canaux de communication est un impératif: les réseaux de télécommunications ou de transport, comme les chemins de fer, les installations d'approvisionnement en énergie et certains services, publics ou privés, tels que les systèmes de vote électronique (l'expérience a d'ailleurs été menée à Genève en octobre 2007) ou les services financiers. En Chine, qui est en avance sur cette question et qui a lancé le développement d'un immense réseau au niveau national, la motivation est clairement d'échapper à l'espionnage des communications par d'autres grandes puissances. Les États-Unis, en particulier, conservent en effet pour l'instant le contrôle des systèmes de cryptage actuels, basé sur des algorithmes déterministes et non sur le caractère parfaitement aléatoire de la physique quantique. Et ils en profitent, comme l'a révélé entre autres l'affaire Edward Snowden, du nom de l'ancien agent américain de la CIA.

La Suisse pourrait-elle aussi se doter d'une telle infrastructure ?

La Suisse a les moyens de créer un réseau de communication quantique à l'échelle nationale. En utilisant les fibres optiques de Swisscom par exemple, il est déjà possible de mettre en place des systèmes de cryptographie

quantique. Les photons ont la particularité d'interagir de manière extrêmement faible avec les atomes dans les fibres optiques. Cela permet de transmettre des photons uniques sur des distances allant jusqu'à 200 km en pratique, et jusqu'à 400 km en conditions de laboratoire, ce qui a été réalisé notamment par une équipe genevoise.

Quels sont les autres domaines du savoir concernés par les technologies quantiques ?

Un autre domaine moins connu mais tout aussi fascinant et prometteur est celui des senseurs quantiques. Il s'agit de systèmes capables de mesurer des grandeurs physiques (température très basse, champ magnétique, force de gravitation...) avec une extrême précision (*lire en page 41*). Le principe consiste une fois de plus à exploiter les propriétés purement quantiques de la matière et de la lumière. Cela permet de développer des instruments de mesure d'une sensibilité inédite et de très petite taille. On peut ainsi obtenir des thermomètres nanoscopiques pouvant être placés sur une cellule ou encore des instruments de navigation indépendants du GPS. La Suisse compte déjà des start-up actives dans ce domaine, notamment Qnami à Bâle. Il y a aussi tout le champ de recherche ouvert par la découverte du graphène, cette feuille de carbone dont l'épaisseur n'est que d'un atome et dont les propriétés surprenantes peuvent bouleverser de nombreuses technologies (*lire en page 43*).

Et qu'en est-il des ordinateurs quantiques ?

Il s'agit d'ordinateurs d'un genre nouveau. Leur fonctionnement est basé sur une logique radicalement différente de celle utilisée par les ordinateurs actuels. Dans un ordinateur quantique, l'information est stockée et manipulée sous forme de bits logiques quantiques, appelés « qubits ». Tout comme un bit d'information classique, un qubit peut porter l'information 0 ou 1. Ce qui est nouveau, c'est que le qubit peut également porter les deux valeurs de 0 et de 1 en même temps. C'est ce qu'on appelle une superposition quantique. Un ordinateur quantique devra être composé d'un très grand nombre de qubits, qui interagiront au sein d'un « circuit quantique ».

Quel est leur avantage ?

Ces machines ne remplaceront pas nos bons vieux ordinateurs dans la vie de tous les jours. Elles permettront en revanche de résoudre certains types de problèmes absolument hors de portée des ordinateurs classiques, aussi

puissants soient-ils, tels que celui consistant à trouver un seul élément donné dans une gigantesque base de données. Pour y arriver, les machines classiques doivent passer en revue toutes les possibilités, c'est-à-dire explorer de fond en comble la base de données. Un ordinateur quantique, lui, sera capable de tester toutes les possibilités en même temps, autrement dit d'inspecter toute la base de données d'un seul coup. Ce « parallélisme quantique » ouvre de nombreuses perspectives, par exemple pour déterminer la structure d'une molécule ou factoriser de grands nombres très rapidement.

Existe-t-il déjà des ordinateurs quantiques ?

Certains groupes de recherche ont réalisé et testé des prototypes d'ordinateurs quantiques, c'est-à-dire des

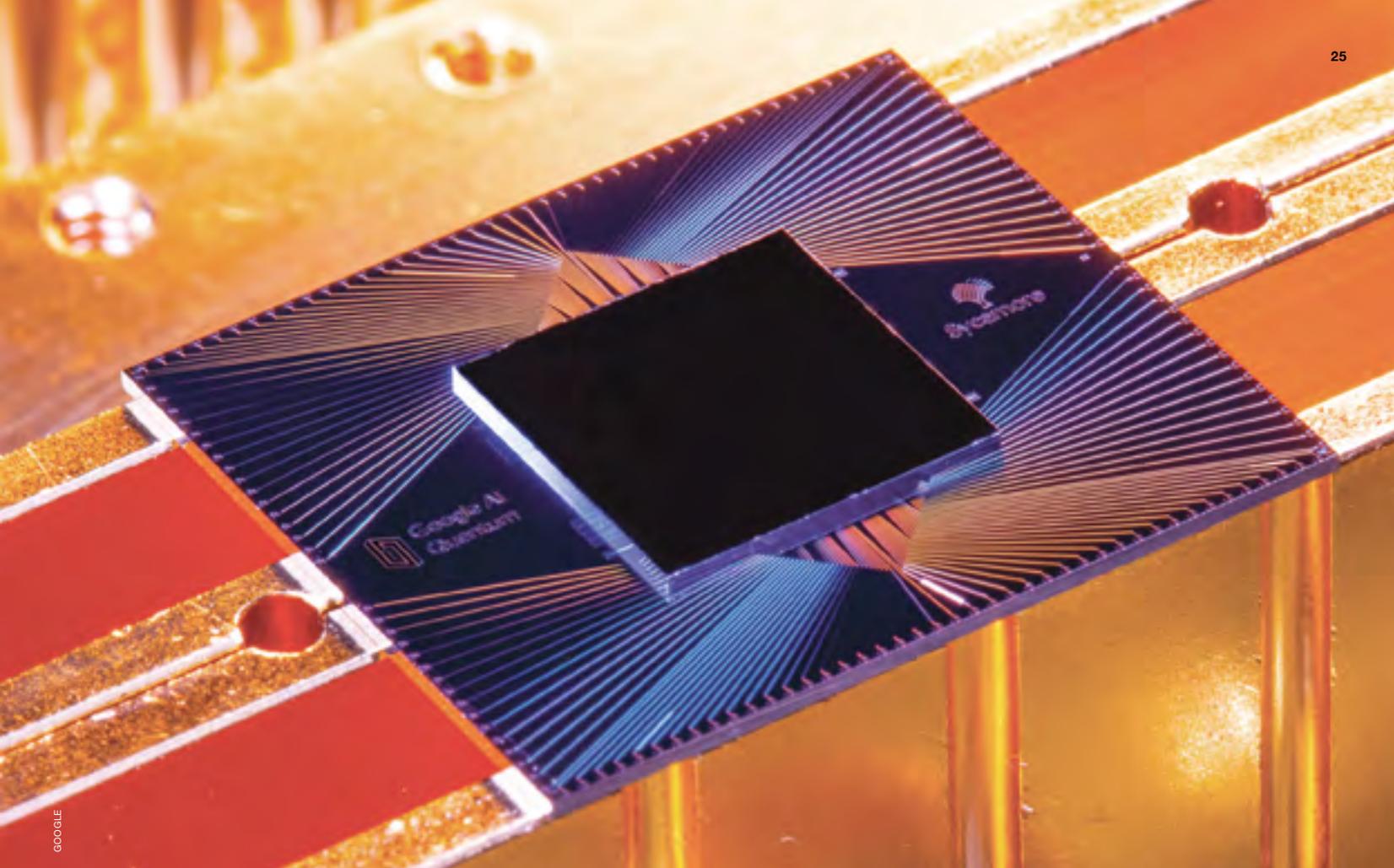
« LES ORDINATEURS QUANTIQUES PERMETTRONT DE RÉSOUDRE CERTAINS TYPES DE PROBLÈMES ABSOLUMENT HORS DE PORTÉE DES ORDINATEURS CLASSIQUES »

machines pouvant manipuler une centaine de qubits environ. Le défi est très grand car pour préserver les propriétés quantiques des qubits, il faut travailler à une température très proche du zéro absolu. Les grandes entreprises d'informatique se sont elles aussi lancées dans la course à l'ordinateur quantique. IBM et Google ont notamment annoncé ces dernières années avoir franchi des étapes importantes dans ce domaine (*lire aussi en page 37*). En Suisse, à l'École polytechnique fédérale de Zurich (ETHZ), des équipes sont elles aussi à la pointe.

Elles travaillent depuis de nombreuses années sur des plateformes expérimentales visant à développer un ordinateur quantique et explorent différentes technologies (ions piégés, supraconductivité, systèmes hybrides...).

Faut-il des logiciels spéciaux pour faire tourner ces machines ?

Oui, et cela représente un champ de recherche important, exploré notamment par des chercheurs des écoles polytechniques fédérales de Lausanne et Zurich. La programmation sur un ordinateur quantique est complètement différente de celle d'un ordinateur classique. Un des premiers résultats – théoriques – en la matière a d'ailleurs consisté à montrer qu'un ordinateur quantique pourrait factoriser de grands nombres très rapidement et ainsi casser les systèmes de cryptage actuels. C'est assez ironique car, d'un côté, la sécurité des communications est mise en péril par l'arrivée de l'ordinateur quantique tandis que de l'autre, la théorie quantique nous fournit une élégante parade sous la forme de la cryptographie quantique, qui est à l'épreuve même d'un ordinateur quantique.



GOOGLE

LE LIVRE BLANC DE LA QUANTIQUE SUISSE

Le Conseil suisse de la science (CSS) a publié en 2020 à l'adresse du Conseil fédéral un livre blanc, *Les technologies quantiques en Suisse, réflexions et recommandations*. Son contenu a pris une tournure particulièrement urgente depuis que les scientifiques suisses se sont retrouvés marginalisés par l'Union européenne, en particulier dans le domaine des technologies quantiques (*lire article principal*). Selon Jean-Marc Triscone, vice-recteur de l'Université de Genève et coauteur du livre blanc, faire cavalier seul dans cette course technologique qui demande de relever d'immenses défis scientifiques et techniques n'est pas idéal. La Suisse risque ainsi de perdre la position enviable qu'elle occupe dans de nombreux domaines. De plus, quand des entreprises privées, qui ont des moyens presque illimités, mettent des milliards de dollars sur la table, il y a le danger bien réel de voir certains chercheurs et

chercheuses des institutions helvétiques être débauchés. Cela dit, précise Jean-Marc Triscone, il ne faut pas baisser les bras, mais trouver des moyens pour faire face à la situation et tout tenter pour rejoindre rapidement les programmes européens. La Suisse a des arguments à faire valoir. Une étude bibliométrique de 2019 a en effet confirmé la grande compétitivité de la recherche fondamentale helvétique dans le domaine quantique. Bien qu'elle ne puisse pas rivaliser avec la Chine, les États-Unis ou l'Allemagne en termes de nombre absolu de publications, la Suisse (avec l'Autriche) est largement en tête en termes de proportion d'articles les plus cités.

Les Programmes de recherche nationaux (PRN) «*QSIT Science et technologie quantiques*», encore en cours, et ceux qui ont précédé ont joué un rôle important dans la position internationale des institutions suisses de recherche.

L'instauration du PRN «*Spin Qubits in Silicon*» en 2020 (pilote par l'Université de Bâle) ainsi que les efforts menés aux écoles polytechniques fédérales de Lausanne (EPFL) et Zurich, à l'Institut Paul Scherer et à l'Université de Genève devraient contribuer à la maintenir. Une des recommandations «*prémonitoires*» des auteurs du livre blanc est d'«*aménager d'autres possibilités de financement au-delà des structures existantes que sont le Fonds national national, Innosuisse, le domaine des EPF ou les programmes européens*». Cette solution commence peut-être à se concrétiser à l'échelle locale puisque l'Université de Genève est en train de mettre en place le Geneva Quantum Center et discute avec l'EPFL de l'idée d'ouvrir ses cours et de permettre de développer des masters dans ce domaine. Des discussions et des projets au niveau suisse sont également en développement.

Selon le livre blanc, la Suisse dispose en outre des capacités et ressources nécessaires pour favoriser et développer une industrie quantique viable. Pour le CSS, promouvoir l'essor des technologies quantiques en Suisse exige néanmoins un soutien constant à la recherche fondamentale et à la formation de jeunes talents ainsi qu'un encouragement des transferts de technologie. Cela passe aussi par une intensification de la communication et de la coordination entre les milieux académiques, les start-up, les investisseurs et les secteurs industriels potentiellement concernés. Cette dernière recommandation revêt une actualité brûlante, étant donné l'exclusion des chercheurs quantiques des programmes européens.

Référence : «*Les technologies quantiques en Suisse, réflexions et recommandations du Conseil suisse de la science (CSS)*», mars 2020, <https://bit.ly/3IGtUuk>

CRYPTOGRAPHIE

LE CODE PARFAIT EST UN RÊVE DEVENU RÉALITÉ

L'UNIVERSITÉ DE GENÈVE JOUE UN RÔLE DE **LEADER MONDIAL** DANS LA RECHERCHE EN MATIÈRE DE CRYPTOGRAPHIE QUANTIQUE. PETIT RETOUR SUR LES ÉTAPES CLÉS D'UNE HISTOIRE QUI DURE DEPUIS BIENTÔT TRENTE ANS.

**Nicolas Gisin**

Professeur honoraire à la Faculté des sciences

Formation : Il obtient son doctorat en physique à l'Université de Genève en 1981 pour sa thèse en physique quantique et statistique. Après un postdoc à l'Université de Rochester, il intègre le monde de l'industrie. En 1988, il revient à l'Université de Genève où il est nommé professeur au Département de physique appliquée.

Parcours : Auteur de nombreuses premières dans le domaine de l'information quantique, il est récompensé entre autres par le prix Descartes en 2004, le tout premier prix John Stewart Bell en 2009 et le prix Marcel-Benoist en 2014.

La cryptographie, autrement dit l'art de coder des messages, a une longue et fascinante histoire qui remonte à l'Antiquité. Du code de César au chiffrement asymétrique d'aujourd'hui, en passant par la machine Enigma et le code Navajo durant la Deuxième Guerre mondiale, les développements aussi bien dans le chiffrement que dans le déchiffrement ont été constants et les anecdotes innombrables. Cette histoire se poursuit aujourd'hui. Elle est même entrée de plain-pied dans l'ère des technologies quantiques. Les propriétés déroutantes et contre-intuitives de la physique quantique permettent en effet de mettre au point un processus assurant une confidentialité, une authenticité et une intégrité parfaites aux messages transmis entre deux personnes (communément appelées Alice et Bob). Si le dispositif est bien conçu, les lois de la nature rendraient alors impossible toute tentative de décodage, quelle que soit la puissance de calcul à disposition de l'éventuel espion (représenté par Ève).

Aujourd'hui, ce genre de dispositifs existe déjà dans la réalité et hors des laboratoires de recherche. La Chine et la Corée du Sud, par exemple, mettent en effet en place des réseaux de cryptographie quantique sur leur territoire par tronçons de fibres optiques d'une ou deux centaines de kilomètres. La Suisse pas encore. Pourtant, la proximité des centres urbains, comme Genève et Lausanne ou Berne et Zurich, en fait un lieu idéal pour ce genre d'infrastructures.

« La technologie, notamment celle de la start-up genevoise ID Quantique, permet aujourd'hui de créer une nouvelle clé quantique par seconde et sur une distance de 100 kilomètres, explique Nicolas Gisin, professeur honoraire à la Faculté des sciences. On peut donc en changer sans cesse. Habituellement sur Internet, les échanges utilisent une nouvelle clé classique par session. Elle est changée une fois par jour ou une fois par semaine, selon les cas de figure. Mais pour les

« 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 »

applications très demandeuses de confidentialité, en particulier dans le domaine financier qui est une des spécialités de la Suisse, il est intéressant de disposer d'un système qui soit remis à jour continuellement. Et c'est là que la cryptographie quantique revêt tout son sens. Si Ève parvient, par miracle, à casser une clé quantique, elle ne pourra intercepter au maximum qu'une seconde de données, ce qui est négligeable. »

Un autre argument en faveur d'un réseau de cryptographie quantique en Suisse, c'est qu'une de ses institutions, l'Université de Genève, joue un rôle de pionnière dans cette discipline depuis bientôt trente ans, c'est-à-dire depuis presque le début. Rétrospective.

Les débuts C'est le physicien britannique Artur Ekert qui, le premier, décrit concrètement, dans la revue *Physical Review Letters* du 5 août 1991, ce à quoi pourrait ressembler une expérience de cryptographie quantique. L'idée reste d'abord confinée à une petite communauté de spécialistes mais elle parvient assez rapidement aux oreilles de Nicolas Gisin. Sa réaction ne se fait pas attendre.



« En lisant les quelques articles traitant de ce sujet, 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 », se rappelle-t-il. Il en fait rapidement un axe de sa recherche.

Le profil du chercheur genevois est unique à cette époque. Il possède 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. Il dispose également dans son laboratoire de détecteurs de photons capables de mesurer ces grains de lumière individuellement. C'est grâce à eux qu'il bricole l'une des premières démonstrations expérimentales de cryptographie quantique.

Clé de cryptage L'équipe qu'il dirige parvient en effet à transmettre un embryon de clé de cryptage – celle qui sert à coder des messages – à travers un kilomètre de fibre optique, comme elle l'expose dans un article paru dans la revue *Europhysics Letters* du 20 août 1993. Protégée par les lois de la physique quantique et basée sur la polarisation de photons (particules de lumière) qui sont transmis l'un après l'autre, cette clé est parfaitement aléatoire et confidentielle. En d'autres termes, si Ève tente de lire le contenu d'une telle clé, elle ne peut le faire qu'en mesurant les photons, ce qui les détruirait et alerterait du même coup Alice

et Bob. Ces résultats font connaître l'équipe genevoise dans le monde de la physique internationale.

Nicolas Gisin et ses collègues cherchent ensuite à perfectionner le système. Ils changent alors de fibres optiques, choisissent celles qui sont exploitées par Swisscom (alors Télécoms PTT) et développent des détecteurs de photons uniques adaptés à ces nouvelles longueurs d'onde. Cette évolution leur permet de sortir la cryptographie quantique du laboratoire. Une première expérience de transmission de clé quantique dans des fibres industrielles, rapportée par la revue *Nature* du 30 novembre 1995, est réalisée sur 23 km, entre Genève et Nyon, en passant sous le lac. La communication quantique entre dans le monde réel.

De l'intrication à la téléportation L'équipe genevoise réalise également des expériences d'intrication quantique, une propriété de la physique quantique potentiellement très intéressante pour la cryptographie quantique. L'intrication désigne ce lien qui peut exister entre deux particules et qui fait qu'une mesure sur la première influence immédiatement l'état de la seconde, comme si elles formaient un seul et même objet alors qu'elles peuvent être éloignées de plusieurs kilomètres l'une de l'autre.

La première preuve expérimentale de l'existence de l'intrication est apportée par le physicien français Alain Aspect en 1982. Mais, comme le rapporte la revue *Science* du 25 juillet 1997, c'est une fois de plus le groupe

de Nicolas Gisin qui se distingue en réalisant la première expérience d'intrication dans des fibres optiques télécoms sur une distance de 10 kilomètres, entre les villages de Bernex et de Bellevue.

La maîtrise du phénomène de l'intrication ouvre la porte à la « téléportation quantique », c'est-à-dire au transfert de l'état physique d'une particule (la valeur de sa polarisation, par exemple) à une autre, par l'entremise d'une paire de particules intriquées (il n'est pas question ici de téléporter de l'énergie ou de la matière mais bien un état quantique).

La quête du répéteur Le principal intérêt de la téléportation quantique 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 donc 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. »

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 de la même année. Quelques années après, Nicolas Gisin et ses collègues réussissent à « stocker » durant une microseconde le premier membre d'une paire de photons intriqués dans un cristal composé de centaines de millions d'atomes refroidis à l'extrême et à le récupérer ensuite, sans que son intrication avec le deuxième ait été rompue. Un dispositif, présenté dans la revue *Nature* du 27 janvier 2011, qui commence à ressembler furieusement au premier prototype d'un « répéteur quantique ». Un tel prototype n'existe pas encore mais des progrès considérables ont été accomplis, en particulier dans les laboratoires de physique genevois. Le problème principal des dispositifs expérimentaux actuels, fonctionnant à une température proche du zéro absolu, c'est qu'ils manquent d'efficacité. Et augmenter cette dernière s'avère techniquement très difficile.

Même si la cryptographie quantique a fait des progrès fulgurants ces dernières décennies, son équivalent classique n'a évidemment pas encore dit son dernier mot. Certaines équipes essaient ainsi de développer une cryptographie classique dite « post-quantique ». Elle serait à l'épreuve des ordinateurs quantiques (qui seraient théo-

MÊME SI LA CRYPTOGRAPHIE QUANTIQUE A FAIT DES PROGRÈS FULGURANTS, SON ÉQUIVALENT CLASSIQUE N'A PAS ENCORE DIT SON DERNIER MOT

riquement capables de casser en un temps raisonnable n'importe quelle clé de chiffrement classique actuelle). *« Le problème, c'est que l'on ne peut pas prouver que ces nouvelles techniques seront résistantes », précise Nicolas Gisin. On peut juste demander aux meilleurs hackers de la planète de tenter de casser ces clés. Même si parmi ces derniers, il y en a très peu qui maîtrisent les ordinateurs quantiques qui, d'ailleurs, n'existent pas encore. Cela n'empêche pas les Américains de pousser, malgré tout, la solution post-quantique dans l'espoir de l'imposer à tout le monde. Les Chinois, qui ont pris une certaine avance dans l'implémentation de la cryptographie quantique justement pour échapper à l'espionnage des États-Unis, ne s'aplatiront cependant jamais à une telle injonction. Ces bisbilles géopolitiques sont l'aspect le plus désagréable de la cryptographie quantique. Mais elles sont inévitables. »*

RECORD DU MONDE

TOUJOURS PLUS LOIN, TOUJOURS PLUS PETIT

LES SCIENTIFIQUES DU DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE APPLIQUÉE TRAVAILLENT AU PERFECTIONNEMENT DE LA CRYPTOGRAPHIE QUANTIQUE. **ILS DÉTIENNENT LE RECORD DE DISTANCE** (421 KILOMÈTRES) SUR LAQUELLE CETTE TECHNIQUE A PU ÊTRE MISE EN ŒUVRE. ILS ONT AUSSI RÉUSSI À MINIATURISER UNE PARTIE DU DISPOSITIF DANS UNE PUCE DE MOINS D'1 MILLIMÈTRE.



Hugo Zbinden

Professeur associé au Département de physique appliquée, Faculté des sciences

Formation : Il obtient son doctorat à l'Université de Berne en 1991. Il rejoint le Département de physique appliquée en 1993. En tant que maître d'enseignement et de recherche, il y dirige les activités expérimentales du groupe.

Parcours : Nommé professeur associé en 2012, il reçoit, entre autres, en 2016 le prix Heinrich Greinacher de l'Institut de physique de l'Université de Berne et la Médaille de l'innovation de l'Université de Genève en 2017 en tant que cofondateur de la start-up ID Quantique.

Dans les systèmes de communication quantique, l'élément essentiel est ce qu'on appelle la distribution d'une clé quantique (QKD, pour *Quantum key distribution*) entre deux interlocuteurs fictifs (appelés par convention Alice et Bob). Et le record du monde de la plus grande distance sur laquelle une telle distribution a pu avoir lieu dans une seule fibre optique est détenu par l'équipe d'Hugo Zbinden, professeur associé au Département de physique appliquée (Faculté des sciences). Dans un article paru le 5 novembre 2018 dans la revue *Physical Review Letters*, lui et ses collègues, dont Alberto Boaron, premier auteur de l'article, présentent en effet une expérience de QKD à travers 421 kilomètres de fibre optique, battant ainsi le record précédent de 404 km obtenu par des chercheurs chinois en 2016. L'équipe genevoise a pu repousser les limites de l'exercice en optimisant toutes les parties du système. Elle a recouru à des fibres optiques de nouvelle génération transmettant plus efficacement la lumière à de nouveaux détecteurs de photons uniques dans leur conception et à une nouvelle méthode d'encodage des signaux quantiques permettant de simplifier le dispositif expérimental tout en préservant son efficacité. Elle a aussi augmenté le taux de génération des états quantiques pour atteindre 2,5 GHz, ce qui signifie que 2,5 milliards de signaux sont envoyés par seconde.

Les clés de cryptage quantiques sont inviolables. Cette infailibilité est basée sur les lois de la physique quantique qui stipulent qu'il est impossible de copier un objet (état) quantique sans le perturber. Les deux utilisateurs s'échangent des états quantiques via des photons dans

lesquels sont encodées des informations. Si un tiers tente d'intercepter cette communication, il introduit nécessairement des erreurs et dévoile immédiatement sa présence. La distance de transmission obtenue par les physiciens genevois représente une étape importante en vue de l'établissement d'un réseau de communication quantique entre les villes, par exemple à l'échelle européenne.

Par satellite « Pour être honnête, depuis notre record, d'autres groupes dans le monde ont couvert des distances plus grandes, précise Hugo Zbinden. Mais ils l'ont fait à l'aide d'un dispositif très différent, avec une source de photons située entre deux portions de fibres optiques distinctes, ce qui permet tout de suite de diminuer les pertes et de doubler la distance. Ce système est vraiment plus complexe que le nôtre et difficile à mettre en œuvre. Il n'est pas sûr qu'il représente un réel avantage. » Une équipe chinoise a ainsi pu atteindre une distance de 600 km (ou plutôt deux fois 300 km), selon l'article paru le 7 juin 2021 dans *Nature Photonics*.

Il convient de citer également le fait qu'une autre équipe chinoise a réussi à transférer une clé quantique entre deux stations terrestres (une en Autriche et l'autre en Chine) en passant par un satellite, baptisé Micius, spécialement conçu pour cela. Dans ce cas de figure, il est nécessaire de faire « confiance » au satellite, qui connaît la clé de cryptage. Pour résoudre ce problème, les chercheurs chinois ont répété l'expérience entre deux stations séparées de 1203 kilomètres à l'aide d'une source de paires de photons intriqués embarquée sur le satellite. Dans l'idée d'une généralisation de la cryptographie quantique à toutes les

LE RECORD DES PHYSICIENS GENEVOIS REPRÉSENTE UNE ÉTAPE IMPORTANTE EN VUE D'UN RÉSEAU DE COMMUNICATION QUANTIQUE ENTRE LES VILLES EUROPÉENNES

Vue d'Alice, le nom donné à la partie de l'expérience de cryptographie quantique qui envoie la clé de codage à son interlocuteur, Bob. Ce qui encombrait il y a quelques années encore une table optique entière (atténuateurs, modulateurs, miroirs, lentilles, coupleurs, interféromètres...) est désormais confiné dans le « chip » doré, visible ci-contre.

communications et donc à celles qui passent par les réseaux de satellites, cela représente une étape importante (d'autres agences spatiales développent d'ailleurs leurs propres projets). Mais pour l'instant, de tels satellites sont très chers, le taux de génération de clés quantiques est très faible et l'instrument, placé en orbite basse, se déplace très vite (il fait le tour de la Terre en une heure environ), laissant peu de temps pour la transmission.

Miniaturisation En attendant, sur Terre, Hugo Zbinden et ses collègues poursuivent leurs efforts de perfectionnement du dispositif de QKD. Leur attention se porte actuellement sur la miniaturisation des composants optiques. Ce qui pouvait encombrer il y a quelques années encore une table optique entière (atténuateurs, modulateurs, miroirs, lentilles, coupleurs, interféromètres...) a ainsi pu être rangé dans un circuit intégré tellement petit qu'il est à peine visible. Tout n'a pas encore pu être miniaturisé de la

sorte mais le gain de volume est déjà spectaculaire. Le laser est encore externe par exemple, mais il est de toute façon déjà très petit. Le tout tient dans une petite boîte et c'est désormais la connectique et les appareils informatiques de pilotage qui prennent le plus de place.

La puce est conçue par une entreprise de design de circuits intégrés et fabriquée par une fonderie en Europe. C'est un changement majeur car jusqu'à présent, le groupe a toujours développé et contrôlé toutes les parties de ses dispositifs de communication quantique. « *Maintenant, si le « chip » a un défaut, ce qui arrive, il nous est évidemment impossible d'aller voir à l'intérieur et de le réparer*, précise Rebecka Sax, qui prépare sa thèse sous la direction d'Hugo Zbinden. *Il nous faut en commander un autre. Un processus qui prend à chaque fois six mois.* »

Du plus beau hasard Un autre axe de recherche du laboratoire vise à l'augmentation de la qualité du hasard produit

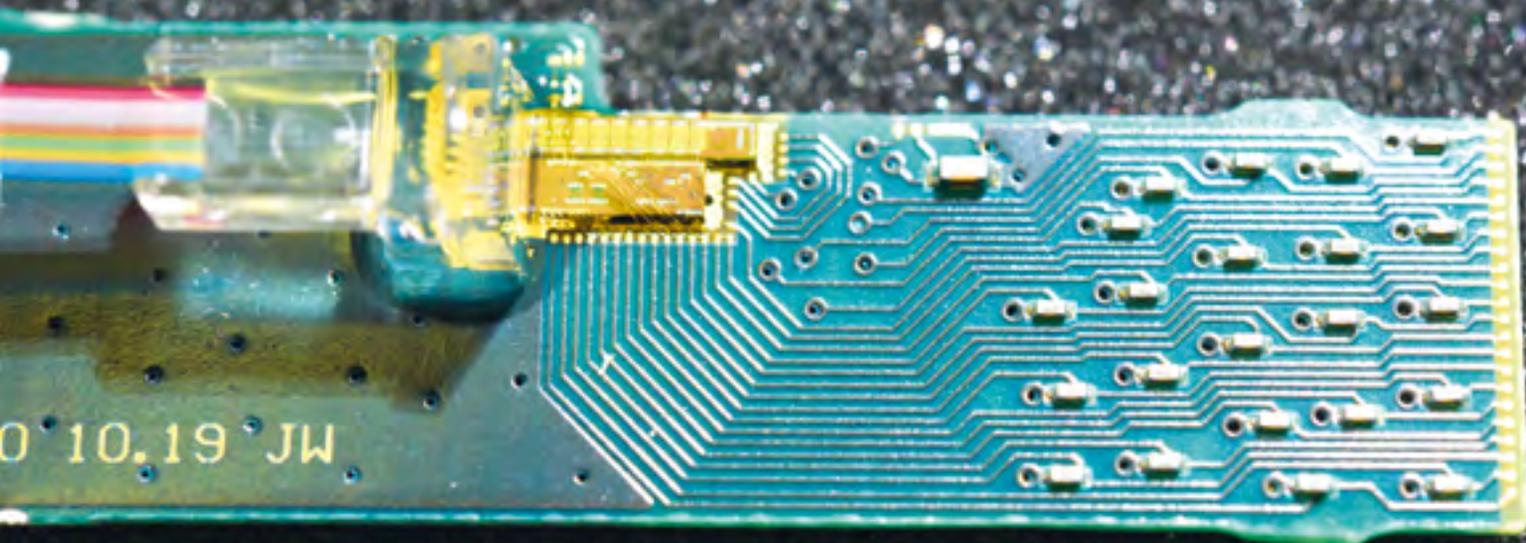
par un dispositif quantique. C'est en effet un générateur de nombres aléatoires (fabriqué par ID Quantique, la spin-off de l'UNIGE, lire aussi en page 34), basé sur les propriétés quantiques des particules élémentaires, en l'occurrence des photons, qui permet de créer des clés de cryptage de manière parfaitement aléatoire.

Cette perfection a été démontrée par les tests statistiques les plus sophistiqués. Ces tests ont néanmoins leurs limites. En réalité, les chercheurs font confiance à la théorie quantique pour prétendre à cette perfection. Le processus physique utilisé dans les générateurs de nombres aléatoires produit, par définition, du hasard parfait. Mais cela n'est valable dans le monde réel que si l'appareil qui l'exploite est suffisamment bien conçu. Pour dire les choses autrement : le doute subsiste.

Pour le dissiper, les physiciens et physiciennes de l'UNIGE ont inventé un système qui améliore un générateur de nombres aléatoires de manière à ce qu'il puisse mesurer *direct* la qualité du hasard qu'il produit lui-même. Le système permet ensuite d'opérer une sélection dans les données que le générateur fournit pour garantir un hasard parfait à 100%.

Ce travail, réalisé dans le cadre du projet QRANGE du Flagship Quantique de l'Union européenne, dirigé par Hugo Zbinden, est arrivé à sa fin. Désormais exclus de ce programme (lire l'article d'ouverture du dossier), les « quantiques » suisses devront à l'avenir jouer leur partition en solo.

UN AUTRE AXE DE RECHERCHE DU LABORATOIRE VISE À L'AUGMENTATION DE LA QUALITÉ DU HASARD PRODUIT PAR UN DISPOSITIF QUANTIQUE



QUELQUES NOTIONS DE CRYPTOGRAPHIE QUANTIQUE GENEVOISE

La cryptographie quantique se base sur des lois de la physique quantique qui ont été maintes fois vérifiées en laboratoire. L'une d'entre elles affirme qu'il est impossible d'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 (dénommé Eve) désire l'intercepter, il alerterait immédiatement les deux interlocuteurs (Alice et Bob).

Dans le dispositif original de cryptographie quantique mis au point au Département de physique appliquée (Faculté des sciences), le système de cryptage se base sur des paires d'impulsions laser ultracourtes, séparées l'une de l'autre de 200 picosecondes (millièmes de milliardième de seconde, de sorte qu'on peut juste distinguer leur temps d'arrivée.

L'intensité de la paire d'impulsions laser est tellement atténuée qu'il n'y a, en général, pas plus d'un seul photon. Celui-ci est présent soit dans la

seconde impulsion. Ce sont les deux états possibles du petit système quantique qui est transmis d'Alice à Bob. L'un correspond à un 1 et l'autre à un 0.

À cela s'ajoute un troisième état, un peu spécial, indéterminé, dans lequel le photon se trouve dans les deux états à la fois. Un peu comme si les deux impulsions étaient « à moitié » remplies, comme le permet la physique quantique. Cet état n'a été imaginé que pour induire Eve en erreur et dévoiler sa présence si l'idée lui venait d'intercepter la transmission de la clé.

Le processus se déroule ensuite en plusieurs étapes.

Au moment de créer une clé de cryptage, Alice prépare l'état de chaque photon avant de l'envoyer à Bob. Il peut s'agir de l'état 1, 0 ou indéterminé. C'est un générateur de nombres aléatoires, basé sur la nature totalement indéterminée d'une valeur physique du photon, qui permet de définir la séquence. Cette dernière n'est le résultat d'aucun logiciel mais bien le fruit du parfait hasard. Il est impossible de casser une

ENVOI D'ALICE	MESURE DE BOB DANS LA	
	base X	base Z
	1	Rien
	0	Rien
	1 ou 0	OK

photon dans une impulsion
 photon dans les deux impulsions à la fois

telle clé, surtout si celle-ci est au moins aussi longue que le message à coder.

Bob, de son côté, mesure les paires d'impulsions et note leur ordre d'arrivée. Il peut effectuer la mesure soit dans la base (X) qui permet de détecter les états 1 et 0 (l'état indéterminé fournit dans ce cas lui aussi un 1 ou un 0, mais de manière totalement aléatoire), soit dans la base (Z) qui permet de déterminer si la paire d'impulsions se trouve ou non dans le troisième état.

Dans la première base, il mesure simplement le temps

d'arrivée de l'impulsion, à partir duquel il détermine s'il s'agit de la première ou de la seconde impulsion à l'intérieur de la paire. Dans la seconde, il utilise un autre type de mesure, basée sur l'interférométrie. Il ne peut pas mesurer dans les deux bases à la fois. Il les choisit au hasard.

Il conserve tous les 1 et les 0 obtenus avec la première base et néglige tous les autres résultats (dont les erreurs). Il envoie à Alice les temps d'arrivée des 1 et 0 retenus ainsi que la séquence des bases qu'il a utilisées pour effectuer ces

mesures. Ces informations peuvent transiter publiquement, sans aucune précaution, puisqu'elles ne fournissent aucune indication sur l'ordre des 1 et des 0 retenus par Bob.

Alice envoie en retour les détections que Bob peut garder et celles qu'il doit enlever (dont celles correspondant aux états indéterminés et dont elle ne peut pas connaître le résultat obtenu par Bob).

À partir de là, Alice et Bob peuvent reconstituer la même clé. Cette opération, qui a l'air fastidieuse, est réalisée 2,5 milliards de fois par seconde. Dès que la clé a la longueur désirée, Alice encode son message et l'envoie à Bob qui peut le décoder. Aucun ordinateur au monde ni aucun espion ne pourra en décrypter le contenu.

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

incohérences apparaissent. Eve ne peut pas non plus réinjecter dans le canal quantique établi entre Alice et Bob un photon identique à celui qu'elle a espionné et donc détruit. Car si elle mesure le photon alors qu'il se trouve dans son état indéterminé, elle ne peut pas le reconnaître en tant que tel puisque sa mesure fournira forcément un 1 ou un 0, lois de la physique quantique obligent.

Alors bien sûr, si quelqu'un espionne directement ce qu'Alice tape sur son clavier, par exemple à l'aide de méthodes aussi sophistiquées que l'analyse fine des vibrations de la fenêtre générées par le bruit des touches, toute cette technologie perd de son intérêt. Mais quel genre de cachottière serait Alice si elle prenait le risque de se confier depuis une pièce aussi exposée ?

RELAIS QUANTIQUE

RÉPÉTITION GÉNÉRALE

LA CRYPTOGRAPHIE QUANTIQUE PAR FIBRE OPTIQUE EST AUJOURD'HUI LIMITÉE À QUELQUES CENTAINES DE KILOMÈTRES. **LA SOLUTION POUR ALLER PLUS LOIN PASSE PAR DES RÉPÉTEURS QUANTIQUES** MAIS LEUR CONCEPTION REPRÉSENTE UN DÉFI TECHNOLOGIQUE CONSIDÉRABLE

Expérience d'activation d'une mémoire quantique. Le laser jaune sert à manipuler les atomes pendant le processus de stockage. Le cristal qui sert à stocker les photons se trouve à l'intérieur du boîtier (haut de l'image).

Aujourd'hui, il est possible d'utiliser la cryptographie quantique en conditions réelles (hors laboratoire) dans une fibre optique d'une longueur de quelques centaines de kilomètres.

Au-delà, les photons se perdent et le signal s'amenuise. Comme on ne peut pas copier ou amplifier ce même signal quantique, sous peine de le détruire (c'est le propre d'un état quantique et c'est aussi ce qui assure la confidentialité de la transmission), il est nécessaire de développer des sortes de relais. Exploitant eux aussi les caractéristiques quantiques de la matière, ceux-ci doivent être capables de répéter le signal de loin en loin afin de pouvoir le diffuser sur de plus longues distances. Ce qui est exactement le domaine de recherche de Mikael Afzelius, maître d'enseignement et de recherche au Département de physique appliquée (Faculté des sciences).

«*En 2008, nous avons imaginé une méthode qui nous permettrait de fabriquer une mémoire quantique et de l'utiliser comme répéteur dans un réseau de communication quantique, explique-t-il. Depuis, nous travaillons sans relâche à la réaliser.*»

Le système imaginé par le chercheur exploite l'intrication, un phénomène purement quantique et largement contre-intuitif. Il désigne le fait que deux photons, par exemple, peuvent

être corrélés : une action sur l'un engendre un effet immédiat sur l'autre, qu'ils soient éloignés d'un millimètre ou de plusieurs kilomètres et alors qu'aucun lien tangible ne les unit. Deux photons intriqués peuvent être considérés comme deux manifestations, à deux endroits différents, d'un seul objet. Un concept de « non-localité » qui n'existe pas dans le monde classique et qui permet notamment de réaliser de la cryptographie quantique.

Mémoires intriquées L'objectif consiste donc à créer une paire de photons intriqués et à les acheminer chacun vers une mémoire quantique. Une fois à l'intérieur de ce solide, le photon transfère son état quantique, y compris son intrication, à un grand nombre d'atomes du cristal avant de disparaître. Au final, il ne reste que deux

mémoires quantiques intriquées entre elles. Le problème, c'est qu'il faut que le stockage dure assez longtemps pour permettre la création d'une intrication entre tout un réseau de mémoires.

Les physiciens genevois ont réalisé des progrès importants dans ce domaine. Il y a dix ans, ils réussissent, pour la première fois, à stocker un photon intriqué durant 100 nanosecondes (milliardièmes de seconde). En 2017, la marque atteint une microseconde, soit 10 000 fois mieux. Et l'équipe genevoise est sur le point de publier le temps record d'un dixième de seconde.

«*Pour un état quantique, c'est une éternité, commente Mikael Afzelius. Mais notre objectif pour les années à venir, dans l'optique de réaliser un jour un réseau de communication quantique, c'est d'atteindre un stockage qui tienne le coup une dizaine de secondes et de le réaliser à bonne distance, typiquement après une dizaine de kilomètres de fibre optique.*»

LE PROBLÈME, C'EST QU'IL FAUT QUE LE STOCKAGE DURE ASSEZ LONGTEMPS POUR PERMETTRE LA CRÉATION D'UNE INTRICATION ENTRE TOUT UN RÉSEAU DE MÉMOIRES

Des milliers de photons à la fois Le temps de stockage et la distance ne sont pas les seuls défis technologiques à relever. Le dispositif doit aussi atteindre une bonne efficacité et, surtout, pouvoir stocker des milliers de photons en même temps. Et cela, c'est encore de la musique d'avenir.

L'équipe de Mikael Afzelius travaille actuellement avec des mémoires quantiques constituées de cristaux dopés avec de petites quantités de terres rares

comme l'ytterbium et l'euprium. L'expérience est maintenue à une température très basse, à 3 ou 4 degrés au-dessus du zéro absolu (-273,15 °C), afin de pouvoir conserver l'intégrité des états quantiques. En effet, dès que la température monte à 10° au-dessus du zéro absolu, l'agitation thermique dans le cristal devient suffisante pour détruire l'intrication des atomes.

«*Les répéteurs quantiques serviront à porter la cryptographie quantique sur des distances plus grandes que quelques centaines de kilomètres, explique Mikael Afzelius. Mais ils pourront aussi contribuer à ce qu'on appelle l'Internet quantique. Il s'agit d'un réseau qui connecterait les futurs ordinateurs quantiques entre eux et permettrait de les faire fonctionner en parallèle. Et donc de multiplier d'autant plus leur puissance de calcul.*»



Mikael Afzelius

Maître d'enseignement et de recherche au Département de physique appliquée, Faculté des sciences

Formation : En 2004, il obtient sa thèse à l'Université de Lund, en Suède. Il rejoint alors l'Université de Genève.

Parcours : Il obtient un poste de maître d'enseignement et de recherche au Département de physique appliquée en 2007.

ID QUANTIQUE, À LA CONQUÊTE DE L'ESPACE ET DES SMARTPHONES

LA START-UP SPÉCIALISÉE DANS LA COMMUNICATION QUANTIQUE, NÉE IL Y A EXACTEMENT VINGT ANS À L'UNIVERSITÉ DE GENÈVE, EST **UNE VÉRITABLE «SUCCESS-STORY»**. RÉCIT



Grégoire Ribordy

Directeur d'ID Quantique

Formation : Titulaire d'une thèse sur la cryptographie quantique expérimentale en 2000 et d'un certificat de gestion d'entreprise à l'Université de Lausanne.

Parcours : Avec Nicolas Gisin et Hugo Zbinden, il fonde ID Quantique qu'il dirige encore aujourd'hui. L'entreprise emploie une centaine de personnes dans le monde. Elle a remporté plusieurs prix, dont la Médaille de l'innovation de l'Université de Genève en 2017 et le Prix de l'innovation de la Chambre de commerce et d'industrie de Genève en 2019.

Vingt ans d'âge, 85 employés à Carouge (une centaine dans le monde), des revenus cumulés atteignant plus de 100 millions de francs : ID Quantique, la start-up issue de l'Université de Genève, développe et commercialise des générateurs de nombres aléatoires, des systèmes de cryptographie quantique, des détecteurs de photons uniques : tout ce qu'il faut, en somme, pour mettre en place un système de communication quantique à l'épreuve de toute tentative d'espionnage et, surtout, à la pointe de la technologie. Bref, l'entreprise roule sur la voie du succès. Une voie relativement dégagée jusqu'à présent mais qui s'annonce nettement plus cahoteuse dans les mois, voire les années à venir. La faute à l'éviction de la Suisse des grands programmes de recherche européens (lire article d'ouverture de dossier).

«*Nous sommes passés subitement de partenaire à part entière à celui de sous-traitant, voire de fournisseur en équipement*, confirme Grégoire Ribordy, cofondateur et directeur d'ID Quantique. *Comme, en plus, le domaine du quantique est devenu stratégique, au même titre que le spatial, il ne fait aucun doute que l'Europe va chercher à développer des entreprises concurrentes à la nôtre à l'intérieur de ses frontières. Afin de conserver notre position de leader dans notre domaine, nous cherchons donc à nous implanter en Europe, où le marché est plus important qu'en Suisse. Nous ne supprimerons pas de postes en Suisse mais nous en créerons de nouveaux à l'étranger.*»

La situation est d'autant plus paradoxale qu'ID Quantique doit une grande partie de son succès à ces mêmes programmes-cadres européens dont elle est une créature, en quelque sorte, puisqu'elle y a participé en tant partenaire industriel incontournable dans les projets de technologie quantique depuis sa fondation en 2001.

Formation en cachette L'idée de créer une entreprise naît dans la tête de Grégoire Ribordy à la fin des années 1990, alors qu'il n'a pas encore terminé son travail de thèse sur la cryptographie quantique expérimentale à la Section de physique. Au cours de son doctorat, il décide ainsi de

suivre en parallèle un certificat de gestion d'entreprise à l'Université de Lausanne. Il le fait en catimini, car il craint que son directeur de thèse Nicolas Gisin, alors professeur au Département de physique appliquée (Faculté des sciences), lui reproche de ne pas consacrer tout son temps à son travail. Crainte infondée car il termine les deux formations avec succès.

«*À la fin de ma thèse, une compagnie américaine déjà active dans les technologies quantiques et intéressée par les travaux du laboratoire est venue nous voir*, se souvient Grégoire Ribordy.

Elle voulait collaborer avec nous et nous acheter une licence afin de pouvoir commercialiser des appareils basés sur nos résultats. Nous avons refusé, car nous aurions perdu le contrôle de nos découvertes. Nous avons préféré tenter l'aventure par nous-mêmes.»

Et c'est ainsi qu'en octobre 2001, Grégoire Ribordy, Nicolas Gisin, aujourd'hui professeur honoraire à la Faculté des sciences, et deux autres chercheurs du département, Hugo Zbinden, actuellement professeur à la Section de physique, et Olivier Guinnard fondent une start-up active dans la technologie quantique. Le premier

nom imaginé pour l'entreprise est Q-sec mais il est rapidement écarté pour des raisons de jeux de mots douteux. «*À l'époque, sur la tour de la Télévision suisse romande, qui se trouve juste derrière nos locaux, était affiché en grand le slogan «idée suisse», s'amuse Grégoire Ribordy. Nous l'avons repris pour en faire idée quantique.*»

Le but de la start-up est, bien sûr, de commercialiser des appareils de cryptographie quantique. Mais un tel marché n'existe pas encore. Nicolas Gisin et Grégoire Ribordy décident donc de commencer par les instruments les plus simples à développer dans ce domaine et qui pourraient être utiles pour d'autres applications, à savoir des détecteurs de photons uniques et des générateurs de nombres aléatoires. Le premier acheteur ne se fait pas attendre. Un laboratoire de l'Université de Boston aux États-Unis passe en effet commande pour un détecteur de photons uniques avant même que la start-up ne soit formellement créée.

LE PREMIER NOM IMAGINÉ POUR L'ENTREPRISE EST Q-SEC MAIS IL EST RAPIDEMENT ÉCARTÉ POUR CAUSE DE JEUX DE MOTS DOUTEUX



Le Cerberis XG
(ci-dessus), dernier modèle de distribution de clés quantiques (QKD) d'ID Quantique.

L'instrument, lui, n'existe que sur le papier. Grégoire Ribordy fait néanmoins une offre, accompagnée d'un schéma de l'appareil tel qu'il l'imagine et envoie le tout par fax. Affaire conclue. Les Genevois ont six mois pour produire le détecteur.

« C'est à ce moment que la montre a commencé à tourner, raconte Grégoire Ribordy. Elle ne s'est plus arrêtée depuis. »

Départ modeste Le premier appareil est livré en 2002 en temps et en heure. Les fonds propres de départ, l'argent encaissé lors de cette première vente et un prix décerné par la Fondation W. A. de Vigier lancent la start-up, même si les sommes engagées sont encore modestes. Les premiers générateurs de nombres aléatoires, assez volumineux au départ, intéressent rapidement les sociétés proposant des jeux de hasard en ligne. Les détecteurs de photons uniques, quant à eux, attirent surtout les laboratoires de recherche. Durant les premiers mois, ID Quantique bénéficie d'un espace au sein de l'Université de Genève pour mener ses activités de recherche, de développement et de production. En décembre 2003, une première levée de fonds permet de rassembler 1,5 million de francs et ID Quantique déménage à Carouge afin d'intégrer ses propres locaux, après avoir engagé son premier employé en janvier 2003.

Petit à petit, les affaires se développent et, en 2007, ID Quantique est à même de commercialiser un système de distribution de clés quantiques (QKD pour *Quantum Key Distribution*) qui permet de mettre en œuvre, dans la vie réelle, la cryptographie quantique. Entre 2007 et 2015, le système est notamment déployé à Genève dans le cadre des élections fédérales et cantonales pour sécuriser la ligne reliant l'espace de dépouillement d'Uni Mail à son centre de données des Acacias.

« C'était une expérience fantastique, se souvient Grégoire Ribordy. Nous avons mis du temps pour nouer des contacts mais dès que la décision de mettre en place ce système de cryptographie quantique a été prise, nous l'avons fait en un mois. Les autorités nous ont beaucoup aidés. L'idée était d'assurer non seulement la confidentialité des informations mais aussi, et surtout, leur intégrité. L'expérience s'est soldée par un succès mais s'est malheureusement arrêtée d'elle-même au bout de quelques années. Cela dit, elle pourrait tout à fait être réactivée. »

Dans l'espace Conservant toujours des liens étroits avec les équipes du Département de physique appliquée, ID

Quantique participe à différents records du monde de distance pour la distribution de clés quantiques: 307 kilomètres en 2014, puis 421 km en 2018.

En 2017, ArianeGroup sélectionne l'instrumentation de la start-up genevoise – y compris un ensemble de détecteurs de photons uniques supraconducteurs à haute sensibilité et ultrarapides – pour être intégrés aux équipements de test au sol dédiés au lanceur Ariane 6, dont le premier tir est prévu pour 2022.

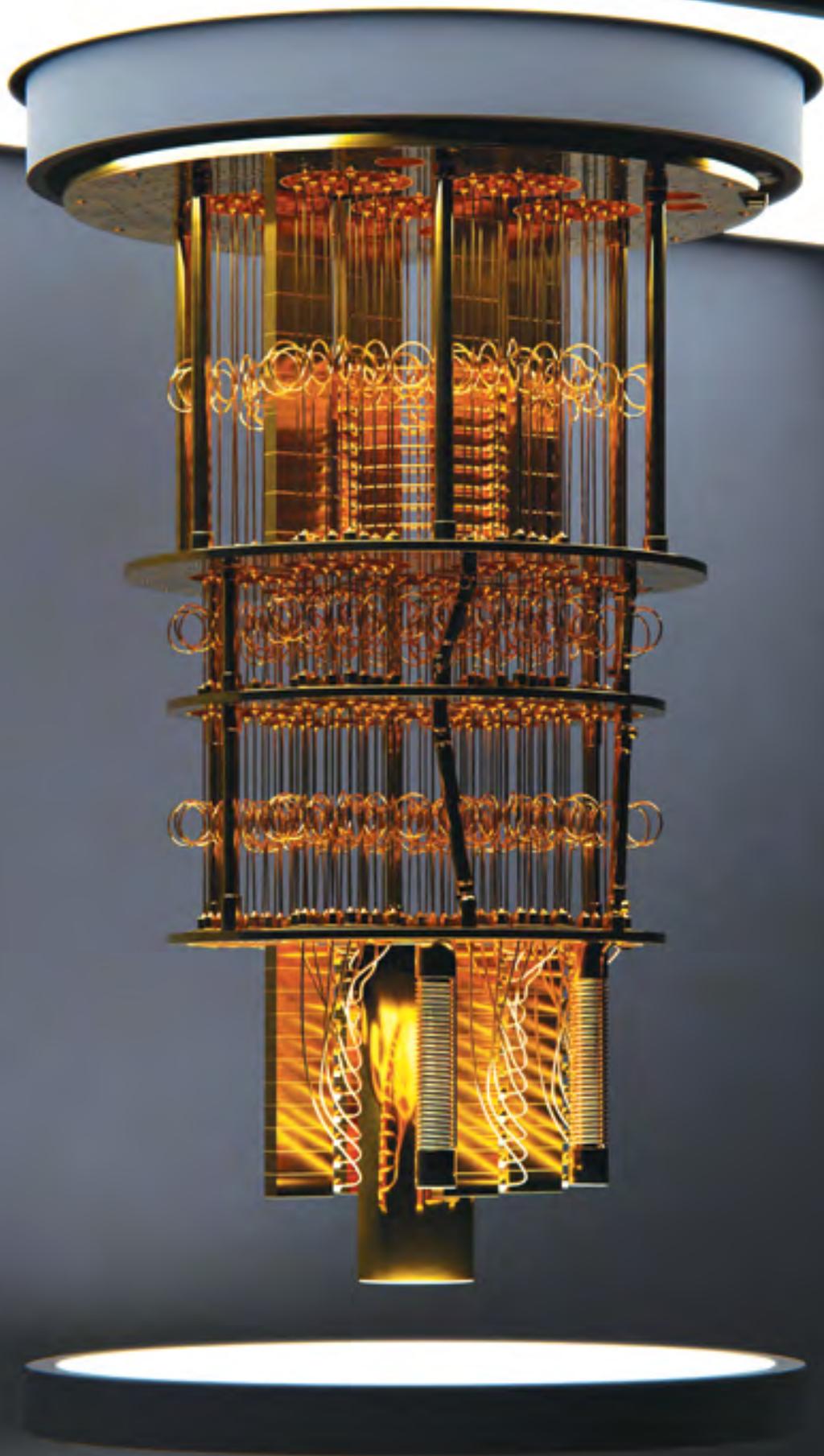
Tout aussi spectaculaire est l'intégration, dans un modèle de téléphone mobile sud-coréen Samsung, d'un générateur de nombres aléatoires miniaturisé en une puce de 2 millimètres de côté. Le dispositif peut être utilisé par les applications téléchargées sur le smartphone (pour l'instant exclusivement sur Android) et permet de produire des clés de cryptage parfaites en vue de sécuriser la transmission de certaines informations sensibles entre le téléphone et des serveurs distants.

La production de ces petits générateurs est réalisée avec des partenaires en Corée du Sud qui disposent du savoir-faire nécessaire dans le secteur des semi-conducteurs. Elle pourrait passer rapidement de quelques centaines de milliers d'unités à plusieurs millions. D'autant plus qu'un deuxième « modèle quantique », le Samsung Galaxy Quantum 2, est sorti en avril 2021.

Toujours en Corée du Sud, ID Quantique collabore avec le principal opérateur de télécommunications, SK Telecom, (qui a récemment investi 65 millions de dollars dans l'entreprise genevoise) pour déployer un réseau de communication quantique à l'échelle nationale et relier ainsi une quarantaine de sites officiels du gouvernement. En dehors de ce qui se fait en Chine, il s'agit du plus important réseau de communication quantique au monde.

« La taille de ce pays est idéale pour ce genre d'infrastructure, précise Grégoire Ribordy. Les différents sites gouvernementaux sont éloignés les uns des autres de 100 kilomètres maximum, ce qui est la distance typique sur laquelle on peut propager la cryptographie quantique. Ils peuvent donc jouer le rôle de relais de confiance entre deux tronçons parfaitement sécurisés, en attendant le développement des premiers répéteurs quantiques encore à l'étude (lire article en page 32). »

Plus petite et plus densément peuplée que la Corée du Sud, la Suisse pourrait d'ailleurs s'en inspirer pour lancer un projet similaire.



MAÎTRISE DES QUBITS

L'ORDINATEUR QUANTIQUE EST À LA CROISÉE DES CHEMINS

IL EXISTE DÉJÀ DES ORDINATEURS QUANTIQUES MAIS ILS SONT ENCORE TROP PETITS POUR ÊTRE CAPABLES DE SURPASSER LEURS HOMOLOGUES CLASSIQUES.

LE POTENTIEL DE TELLES MACHINES EST TOUTEFOIS ÉNORME. LES DÉFIS SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES POUR LES DÉVELOPPER LE SONT TOUT AUTANT.

Depuis des décennies, la puissance des ordinateurs classiques suit une progression vertigineuse. Cela ne suffira cependant probablement jamais pour résoudre certains problèmes identifiés par les scientifiques et les ingénieurs. Qu'il s'agisse de factoriser un (très, très) grand nombre en nombres premiers, de prévoir la structure électronique et les propriétés dynamiques des molécules et matériaux complexes, de simuler un système quantique comprenant plus qu'une cinquantaine de particules libres ou encore d'optimiser le trajet du commis voyageur visitant un certain nombre de villes (problème emblématique de la théorie de la complexité), les machines classiques pourraient, en effet, ne jamais faire l'affaire. Il manque souvent la méthode, analytique ou numérique, pour venir à bout de ces systèmes complexes en des temps inférieurs à celui de l'âge de l'Univers.

Les ordinateurs quantiques, eux, pourraient y arriver. À condition bien sûr qu'ils atteignent un stade de développement technologique suffisant. Ce qui n'est pas encore le cas. « Nous nous trouvons à la croisée des chemins, estime Thierry Giamarchi, professeur au Département de physique de la matière quantique (Faculté des sciences). Il existe déjà des ordinateurs quantiques mais de taille encore très modeste. Le potentiel de ces machines est phénoménal. Les défis scientifiques et, surtout, technologiques à relever le sont cependant tout autant. »

Le principe de fonctionnement des ordinateurs quantiques diffère grandement des machines ordinaires. Tandis que la plus petite unité de stockage d'information classique est un « bit » valant 1 ou 0, son équivalent quantique est un « qubit ». Ce dernier, possédant des propriétés quantiques, n'a pas une valeur déterminée mais correspond à une combinaison, ou plus précisément une superposition, d'un 1 et d'un 0, chacune de ces deux valeurs étant, en plus, associée à un « poids », ou à une sorte de probabilité de survenir en cas de mesure. Le qubit vaut donc toutes les valeurs comprises entre 1 et 0 à la fois.

Un qubit tout seul ne sert à rien, pas plus qu'un bit d'ailleurs. Mais on peut en préparer plusieurs et les intriquer,

ce qui, en langage quantique, signifie qu'ils sont fortement corrélés les uns avec les autres.

Dans le monde classique, une série de trois bits ne peut prendre qu'une seule valeur sur les huit possibles, telle « 101 ». Dans le monde quantique, en revanche, trois qubits intriqués sont décrits par une seule « fonction d'onde » qui contient toutes les valeurs possibles à la fois (000, 001, 010, 011, 100, 101, 110 et 111), chacune étant associée à une certaine probabilité. Cela signifie que le système quantique peut traiter toutes les possibilités simultanément. En augmentant le nombre de qubits, on augmente le nombre de combinaisons de manière exponentielle. Ainsi, un système quantique de 50 qubits compte plus d'un million de milliards de configurations possibles.

Massivement parallèle « L'idée de génie est d'avoir imaginé agir sur un ensemble de qubits de telle manière à pouvoir effectuer un grand nombre d'opérations logiques en même temps, explique Thierry Giamarchi. C'est comme si l'on avait un ordinateur massivement parallèle. Dès que toutes les opérations, programmées par un algorithme spécial, sont achevées, le système, toujours intriqué, est décrit par une fonction d'onde sur laquelle on pourrait effectuer une mesure qui fournirait le résultat recherché. Cela représente une accélération gigantesque de la capacité de calcul. »

En théorie, même si le principe de fonctionnement est contre-intuitif, ça marche très bien. D'ailleurs, des chercheurs ont commencé à développer des logiciels quantiques avant même que le premier ordinateur de ce type ne voie le jour. L'un des premiers d'entre eux est celui du mathématicien américain Peter Shor qui a montré, en 1994, qu'un ordinateur quantique pourrait casser la clé de cryptage la plus sophistiquée de l'époque en un temps raisonnable (une réussite précoce qui a d'ailleurs immédiatement dopé l'intérêt pour la cryptographie quantique qui, elle, est à l'épreuve de n'importe quel ordinateur quantique).

En pratique, c'est un peu plus compliqué. Le premier défi, et pas des moindres, consiste à fabriquer des qubits. Plusieurs voies sont explorées : des systèmes avec des ions piégés, avec des semi-conducteurs, avec des supraconducteurs, etc.



Thierry Giamarchi

Professeur au Département de physique de la matière quantique, Faculté des sciences

Formation : Diplômé de l'École normale supérieure de Paris, il obtient son doctorat à l'Université Paris XI en 1987. Membre permanent du CNRS depuis 1986, il effectue un post-doctorat aux Laboratoires Bell, aux États-Unis.

Parcours : Lauréat du prix Anatole et Suzanne Abragam de l'Académie des sciences française en 2000, il est nommé en 2002 professeur au Département de la matière condensée. Il est notamment l'auteur d'une monographie « Quantum physics in one dimension ».

L'essentiel consiste à avoir des « objets » assez petits et assez froids pour pouvoir révéler leur nature quantique et l'exploiter. Ces qubits, qu'il s'agisse d'atomes froids ou de jonction supraconductrice, doivent aussi être intriqués de manière à former un objet unique ou cohérent.

« Or, le plus grand ennemi d'un ordinateur quantique est la *décobérence*, souligne Thierry Giamarchi. *Aucun système, aucune opération, n'est parfait.*

Il y a des sources de bruits extérieures (des ondes essentiellement) que l'on ne maîtrise pas. Et le problème, c'est qu'une fonction d'onde qui comprend beaucoup de qubits intriqués entre eux est incroyablement fragile. La moindre perturbation ou la moindre erreur dans le dispositif lui-même risque de provoquer sa décohérence et de rendre toute l'opération de calcul caduque. »

Le paradoxe, c'est qu'il faut à la fois protéger les qubits de l'influence extérieure afin de conserver leur intégrité et pouvoir les manipuler individuellement, avec un laser, un champ magnétique ou un courant électrique infime, afin d'effectuer des opérations logiques.

Avantage quantique Il existe déjà des prototypes d'ordinateur quantique. Leur puissance de calcul, par contre, n'a pas encore convaincu la communauté scientifique. Le Sycamore de Google est probablement l'une des machines les plus abouties à ce jour. Il est formé d'un processeur de 54 qubits supraconducteurs (dont un défectueux). Selon l'article qui le présente, paru dans la revue *Nature* du 23 octobre 2019, le Sycamore aurait réalisé en 200 secondes une tâche qui aurait pris 10 000 ans au meilleur supercalculateur classique de la planète. IBM, le grand rival de Google dans la course à l'ordinateur quantique, a immédiatement répondu que cette tâche – sans intérêt scientifique mais spécialement adaptée au fonctionnement d'un ordinateur quantique – pouvait en fait être réalisée en quelques jours seulement avec un microprocesseur classique à condition d'utiliser le bon logiciel.

« Ce qui a vraiment écorné l'annonce de Google, c'est le travail d'une équipe de l'Université de Grenoble, précise Thierry Giamarchi. Ces chercheurs ont en effet montré que si le résultat du calcul effectué par le Sycamore avait été très précis, Google aurait eu raison de revendiquer ce qu'on appelle de manière peu élégante la « suprématie quantique », un terme auquel je préfère « avantage quantique ». Mais, en réalité, le résultat publié

UN SYSTÈME QUANTIQUE DE 50 QUBITS COMPTE PLUS D'UN MILLION DE MILLIARDS DE CONFIGURATIONS POSSIBLES

est entaché d'une certaine marge d'erreur. Du coup, si on accepte une telle imprécision, alors on peut effectuer la même tâche plus rapidement avec un ordinateur portable et un logiciel très bien conçu. »

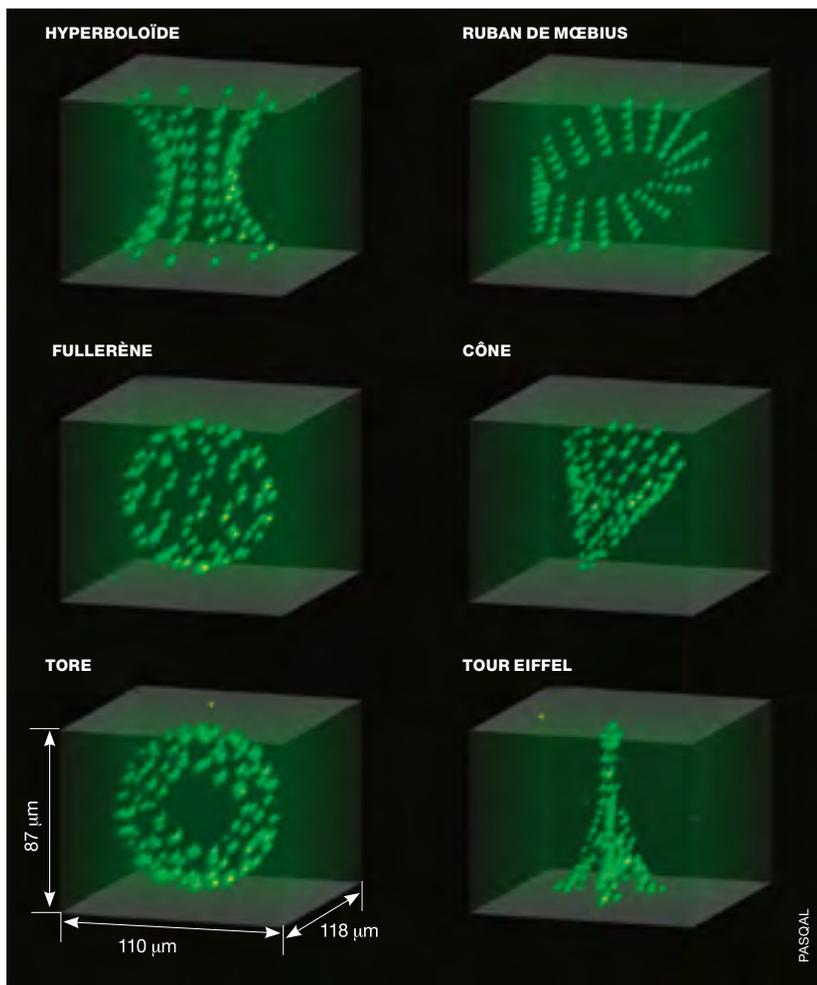
Car un autre problème inhérent aux ordinateurs quantiques est celui de la correction d'erreurs, lesquelles peuvent survenir à tout moment dans le processus de calcul. À cause des propriétés de la mécanique quantique, il est impossible de copier une fonction d'onde afin de la mettre en mémoire. Les ingénieurs ont donc dû se résoudre à consacrer, pour chaque qubit fonctionnel, un certain nombre de qubits supplémentaires destinés à la seule correction de ces erreurs.

Le Sycamore n'est pas le seul prototype d'ordinateur quantique. De son côté, IBM développe une machine concurrente (Quantum System One) qui comptait 27 qubits en 2019. Une équipe chinoise a également présenté un ordinateur quantique « photonique », le Jiuzhang, de 76 qubits dans la revue *Science* du 18 décembre 2020. L'une des limites de cette dernière machine, cependant, est qu'elle est conçue pour n'effectuer qu'un seul type de tâche tandis que l'ordinateur quantique de Google pourrait être programmé pour exécuter une variété d'algorithmes.

Plusieurs laboratoires disposent par ailleurs de leurs propres machines ou plateformes quantiques. L'École polytechnique fédérale de Zurich, par exemple, utilise actuellement des calculateurs quantiques comptant jusqu'à 17 qubits. Elle et l'Institut Paul Scherrer ont créé cette année un *Quantum computing hub* dont l'objectif est le développement d'un ordinateur quantique de 100 qubits.

« La recherche dans ce domaine, scientifique autant que technologique, avance vraiment rapidement, note Thierry Giamarchi. Si on arrive à doubler (au grand minimum) le nombre de qubits par rapport à ce qui se fait de mieux aujourd'hui, à les rendre le plus robustes possible, à bien corriger les erreurs, alors les ordinateurs quantiques devraient pouvoir faire la preuve de leur utilité, à savoir résoudre des problèmes intéressants. J'ignore si l'effort international consenti dans ce domaine accouchera un jour d'un véritable ordinateur quantique qui tienne toutes ses promesses. En revanche, je suis sûr qu'il en sortira de toute façon quelque chose de très intéressant, peut-être pour d'autres applications dont nous n'avons encore aucune idée. »

LE SUCCÈS MONUMENTAL DES « SIMULATIONS QUANTIQUES »



Les points verts représentent des atomes de rubidium refroidis à quelques microdegrés au-dessus du zéro absolu (-273,15 °C) dans un piège magnéto-optique. Les atomes peuvent être manipulés un par un avec des lasers pour les organiser selon différentes formes géométriques en 3D.

Les promesses de l'ordinateur quantique occultent souvent une technologie alternative, appelée les « simulations quantiques », qui, contrairement au premier, a déjà engrangé quelques résultats notables.

« *Le principe est assez simple, estime Thierry Giamarchi, professeur au Département de physique de la matière quantique (Faculté des sciences). Il s'agit de faire une expérience qui représente la réalisation la plus proche possible du modèle théorique que l'on aimerait tester ou résoudre. Ce sont en général des modèles concernant la physique de la matière condensée, c'est-à-dire des solides. L'expérience ressemblant presque parfaitement au modèle, il n'y a donc plus qu'à lire la mesure pour répondre à la question posée.* »

Une des techniques mises au point est basée sur des atomes froids piégés. L'idée consiste à créer un champ électromagnétique stationnaire formant un véritable réseau, avec des creux et des bosses, dans lequel on peut placer des atomes, un peu comme des œufs dans leur boîte.

Pour que cela fonctionne, il faut que les atomes froids soient vraiment très froids. En l'occurrence, les expériences se déroulent à des températures de quelques dizaines de nanoKelvins (milliardième de degré Kelvin), soit quasiment au zéro absolu. L'agitation thermique, si elle devient trop importante, annulerait les effets quantiques recherchés et, surtout, permettrait aux atomes de s'échapper de leur piège délicat.

Aujourd'hui, de nombreux laboratoires dans le monde sont capables de contrôler tous les paramètres définissant la géométrie de ces « boîtes à œufs » : distance de la maille, profondeur des creux, disposition en trois dimensions, etc. Comme elle le montre dans un article paru dans la revue *Nature* en 2018, une équipe de l'Institut d'optique de l'Université de Paris-Saclay a même réussi à reproduire un ruban de Möbius, un hyperboloïde ou encore une tour Eiffel à l'aide d'atomes piégés dans des boucles magnétiques judicieusement placées (voir l'image ci-contre).

Une fois le réseau d'atomes froids disposé convenablement, les scientifiques peuvent effectuer les mesures qu'ils souhaitent. Ils ont devant eux une « simulation quantique » d'un solide, un matériau artificiel en quelque sorte, sur lequel il est possible de tester directement leurs modèles théoriques. À l'aide de lasers ultra-rapides, notamment, ils peuvent mesurer des corrélations et des propriétés très fines, réaliser des expériences hors équilibre, observer le passage d'un matériau de l'état suprafluide à celui d'isolant. Autant de « simulations quantiques » qui seraient impossibles à réaliser à l'aide d'un ordinateur classique.

L'entreprise française Muquans (rachetée par iXblue) a installé son Gravimètre quantique absolu sur l'Etna, en Italie, en 2020. L'appareil fonctionne sur la base d'une mesure de la chute libre d'atomes refroidis dans une chambre à vide et bombardé par un laser (lire l'encadré ci-contre). Il surveille actuellement de manière autonome et continue les activités volcaniques à 2820 mètres d'altitude.

SENSEURS

UNE SENSIBILITÉ À FLEUR DE PARTICULES

EXPLOITANT LES PROPRIÉTÉS DE LA THÉORIE QUI RÉGIT LE MONDE DU TOUT PETIT, LES CAPTEURS QUANTIQUES OFFRENT **UNE SENSIBILITÉ ET UNE PRÉCISION INÉDITES**, À L'EXEMPLE D'UN DISPOSITIF – THÉORIQUE – CAPABLE DE TRANSFORMER LA PLUS MINUSCULE AUGMENTATION DE CHALEUR EN UN COURANT ÉLECTRIQUE UTILE.



Géraldine Haack

Professeure assistante au Département de physique appliquée, Faculté des sciences

Formation : Elle obtient sa thèse à l'Université de Genève en 2012, avant d'effectuer un post-doctorat à l'Université libre de Berlin et au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives en France.

Parcours : Elle revient à l'UNIGE en 2015 au bénéfice d'un subside Marie Heim-Vögtlin du Fonds national suisse. Elle est nommée professeure assistante en juin 2021.

La maîtrise des propriétés quantiques de la matière ouvre la porte au développement de capteurs d'une toute nouvelle catégorie. Il existe déjà sur le marché des appareils qui mesurent des champs magnétiques, des particules de lumière, des différences de température minimes ou encore des variations de la force de gravitation avec une très grande précision. Mais cela n'est encore rien par rapport à ce que les senseurs quantiques seront – ou sont parfois déjà – capables d'accomplir.

On évoque ainsi des systèmes de navigation sans GPS, des détecteurs sensibles à la moindre cavité ou masse enfouie dans le sous-sol (ou sous l'eau), des moyens de prévision des éruptions volcaniques, des mesures de l'activité neuronale ou encore des dispositifs permettant de gérer la dissipation d'énergie des composés nanoélectroniques, présents notamment dans les téléphones mobiles.

Certains de ces appareils existent déjà, même s'ils sont en général très volumineux et maintenus à des températures frisant le zéro absolu et donc le plus souvent encore confinés dans les laboratoires. La plupart n'existent cependant que sur le papier, où se développent les théories, ou dans les ordinateurs, qui font tourner les simulations. Un travail théorique auquel contribue Géraldine Haack, professeure assistante au Département de physique appliquée (Faculté des sciences) et bénéficiaire d'une bourse Prima du Fonds national suisse.

Réchauffement minime Elle mène notamment un projet de dispositif thermoélectrique quantique d'une très grande sensibilité. L'effet thermoélectrique classique est connu depuis la fin du XIX^e siècle. Il caractérise certains matériaux dans lesquels une différence de température génère un courant électrique (et inversement, une tension électrique crée un courant de chaleur). L'objectif de

la chercheuse genevoise consiste à exploiter les propriétés de la physique quantique pour augmenter cet effet thermoélectrique et transformer la moindre différence de température en un courant électrique plus facilement mesurable en laboratoire.

« Mon domaine initial, c'est l'étude du transport d'électrons dans des circuits électriques simples mais fonctionnant à l'échelle quantique, explique Géraldine Haack. Dans le cadre de notre projet, mon collègue italien Francesco Giazotto, directeur de recherche à l'Institut des nanosciences de Pise, et moi-même avons donc imaginé un dispositif qui comprend ce qu'on appelle une boucle Aharonov-Bohm. Il s'agit d'un circuit électrique de très

petite taille – de l'ordre de quelques micromètres – qui relie une source dite chaude à une source dite froide (la différence de température peut être infime). Les électrons circulent de la source chaude à la source froide en vertu de la deuxième loi de la thermodynamique. Ils le font via une connexion qui, à un moment donné, se divise en deux branches qui se rejoignent juste après, laissant la possibilité aux particules chargées de passer par deux chemins différents. »

L'OBJECTIF CONSISTE À EXPLOITER LES PROPRIÉTÉS DE LA PHYSIQUE QUANTIQUE POUR TRANSFORMER LA MOINDRE DIFFÉRENCE DE TEMPÉRATURE EN UN COURANT ÉLECTRIQUE MESURABLE



DANS LES MOINDRES DÉTAILS

Deux catégories de senseurs quantiques sont actuellement en plein développement et parfois proches de la commercialisation. La première correspond aux centres NV (pour « *nitrogen vacancy* »). Il s'agit d'une pointe en diamant comptant des milliards d'atomes parfaitement alignés et un seul défaut, à savoir un atome d'azote et une lacune à la place de deux atomes de carbone. Ces deux impuretés se comportent en fait comme des atomes uniques dont on peut, grâce à une lumière laser notamment, mesurer le « spin », un terme qui désigne un moment magnétique quantique propre à certaines particules élémentaires, sans équivalent dans le monde classique et que l'on peut se représenter comme une petite aiguille sensible à un champ magnétique. Ce dispositif est extraordinairement sensible à

de minimes changements de lumière et de champ magnétique. La start-up bâloise Qnami, cofondée par Patrick Maletinsky, professeur à l'Université de Bâle et auteur d'avancées importantes dans le domaine des centres NV, en développe et en commercialise. En plus de servir de microscope magnétique ultrasensible utile en laboratoire et dans un grand nombre d'applications technologiques, ce genre de dispositif pourrait aussi entrer dans le développement d'instruments de navigation, ajusté sur le champ magnétique terrestre et permettant de se diriger très précisément dans des lieux que le GPS ne peut pas atteindre, par exemple sous l'eau. L'autre catégorie de senseurs quantiques très en vogue comprend les interféromètres à atomes. Ces dispositifs reposent sur un nuage de quelques millions

d'atomes refroidi par laser à une température de seulement un milliardième de degré au-dessus du zéro absolu. Dans ces conditions où l'agitation thermique est réduite au minimum, les atomes se déplacent si lentement qu'il devient possible de mesurer avec une très grande précision les forces auxquelles ils sont soumis, comme la gravitation. Pour ce faire, on laisse les atomes chuter sous l'effet de la gravité. Ils sont alors bombardés par un laser qui place chaque atome dans une superposition d'état quantique – il se trouve dans celui de n'avoir pas absorbé de photon laser et en même temps dans celui où il a reçu une vitesse supplémentaire. On peut alors faire interférer les deux états – selon le même principe qui permet de faire fonctionner la boucle Aharonov-Bohm pour l'effet thermoélectrique (*lire article*

principal) – et en déduire avec une très grande efficacité la valeur de l'accélération terrestre. Certaines études font état d'une précision d'un milliardième, soit la variation de pesanteur ressentie lorsqu'on s'élève de trois millimètres de la surface de la Terre. Avec des gravimètres atomiques d'une telle précision, il devient imaginable de détecter des volumes de plus en plus petits dont les densités diffèrent de leur environnement et contribuent ainsi à une légère augmentation ou diminution locale de la pesanteur : des nappes phréatiques, certains types de roches, des arrivées de magma, etc. Une entreprise française, Muquans, (rachetée depuis par iXblue, française également), commercialise d'ores et déjà de tels gravimètres atomiques.

Comprendre plus précisément l'effet Aharonov-Bohm demande cependant de faire un gros plongeon dans un bain de physique quantique, puisque ce phénomène découle du fait qu'une particule comme l'électron possède, à toute petite échelle, des propriétés à la fois corpusculaires et ondulatoires.

Par les deux chemins à la fois Du point de vue du formalisme quantique, le petit paquet d'ondes qui forme la particule peut donc passer par les deux chemins en même temps : par le bras supérieur *et* par le bras inférieur – comme le ferait une onde à la surface de l'eau empruntant deux parcours différents. Parce que les deux chemins ne sont pas de la même longueur et que le tout est baigné dans un champ magnétique, les paquets d'ondes acquièrent une phase différente entre les chemins supérieur et inférieur et forment, à l'arrivée, ce qu'on appelle une figure d'interférences, avec des maximums et des minimums, là où les ondes s'additionnent ou se détruisent, comme lorsque les ronds dans l'eau générés par deux cailloux se rencontrent. Parce qu'elles sont issues d'un unique électron pouvant être décrit comme un paquet d'ondes, ces interférences quantiques produisent au final un courant électrique qui oscille en fonction du flux magnétique et que l'on peut mesurer.

Géraldine Haack et Francesco Giazotto ont montré, dans un article paru le 23 décembre 2019 dans la revue *Physical Review B*, que leur dispositif, en théorie du moins, développe un formidable effet thermoélectrique.

« Il est tellement sensible qu'il pourrait détecter une augmentation de chaleur aussi petite que celle provoquée par l'absorption d'un unique photon (ou grain de lumière), explique Géraldine Haack. On peut imaginer jouer avec les paramètres de notre dispositif de telle façon qu'il soit optimisé pour des photons d'une certaine longueur d'onde. Certains groupes de recherche ont actuellement une telle maîtrise dans la fabrication de ces structures mésoscopiques (c'est-à-dire de taille relativement « grande » mais conservant des propriétés quantiques), qu'il ne devrait pas être trop compliqué de réaliser l'expérience en laboratoire. »

Photons uniques En tant que capteur thermoélectrique, le détecteur basé sur la boucle Aharonov-Bohm pourrait permettre de mesurer de toutes petites différences de chaleur à une température très proche du zéro absolu (-273,15 °C), ce qui tient en général de la gageure dans les laboratoires de recherche. Plus concrètement, avec ce dispositif quantique on pourrait atteindre une efficacité jusqu'à quatre fois plus importante que les matériaux thermoélectriques classiques les plus performants.

« Le fait qu'une petite augmentation de chaleur puisse générer un courant de charge peut aussi intéresser tous les secteurs qui doivent faire face au phénomène de dissipation de chaleur, poursuit Géraldine Haack. Ce problème de dissipation touche l'ensemble des appareils électroniques, des téléphones portables aux fermes géantes de serveurs, et peut nuire gravement à leurs performances. On peut bien sûr construire ces immenses data

LE PETIT PAQUET D'ONDES QUI FORME LA PARTICULE PEUT DONC PASSER PAR LES DEUX CHEMINS EN MÊME TEMPS

centers dans des environnements froids – ce qui se fait déjà – mais ce n'est pas un choix très durable. On peut aussi essayer de comprendre les mécanismes intimes, voire quantiques, de cette dissipation de chaleur pour tenter de l'atténuer. Un dispositif comme le nôtre pourrait servir à cela. »

Une autre piste serait d'exploiter cette chaleur résiduelle (qui est de toute façon impossible à éviter) pour la transformer en électricité, laquelle pourrait être réinjectée dans le circuit de l'appareil en question ou, pourquoi pas, faire tourner un mini-moteur. *« Un des points de ma recherche, c'est justement de concevoir des moteurs ou des machines thermiques à l'échelle quantique »,* note au passage Géraldine Haack.

NOUVEAUX MATÉRIAUX

LE GRAPHÈNE, UN MONDE EN DEUX DIMENSIONS

LE GRAPHÈNE, **UNE COUCHE MONOATOMIQUE DE CARBONE**, AINSI QUE SES DÉRIVÉS (COMPOSÉS D'AUTRES ÉLÉMENTS) POURRAIENT REPRÉSENTER, GRÂCE À LEURS PROPRIÉTÉS SURPRENANTES, LES BRIQUES DE BASE POUR FABRIQUER LES MATÉRIAUX DE DEMAIN.



Alberto Morpurgo

Professeur au Département de physique de la matière quantique, Faculté des sciences

Formation : Après une maîtrise en physique à l'Université de Gênes (Italie), il est passé par la Scuola Normale de Pise et l'Université de Groningue (Pays-Bas), où il a obtenu un doctorat en 1998.

Parcours : Après un post-doctorat à l'Université Stanford et plusieurs années à l'Université de Delft, il obtient un poste de professeur à l'Université de Genève en 2008. En 2016, il est élu au Conseil de la recherche du Fonds national suisse.

Le graphène est aussi mince que possible, plus résistant que l'acier, flexible, transparent. C'est un excellent conducteur, il est léger comme l'air, sélectivement perméable et, surtout, en deux dimensions. Ce matériau quantique aux mille promesses est en effet composé d'une seule couche d'atomes de carbone dont l'empilement forme le graphite, le même que celui des crayons gris. La prouesse de son découvreur, Andre Geim, de l'Université de Manchester, est « simple-ment » d'avoir réussi à isoler une seule de ces feuilles en 2004.

Depuis, des progrès considérables ont été accomplis dans ce vaste champ de recherche qui s'est subitement ouvert aux scientifiques. On a découvert au graphène une propriété remarquable après l'autre. On lui promet un avenir radieux comme composant ultraléger pour la voiture ou l'aéronautique, comme super-pile pour le stockage de l'énergie, comme détecteur chimique hypersensible, comme transistor extra-rapide ou encore dans la fabrication d'écrans tactiles flexibles.

Matériau quantique « *Le graphène est un matériau de nature quantique dans le sens qu'on n'arrive à maîtriser ses composants au niveau atomique et à obtenir des propriétés nouvelles qui ne peuvent s'expliquer que par la physique quantique* », commente Alberto Morpurgo, professeur au Département de physique de la matière quantique (Faculté des sciences) et responsable adjoint de l'une des six divisions (Enabling science and materials) du Graphene Flagship, un projet

phare de l'Union européenne lancé en 2013 (*lire encadré*). Depuis plusieurs années, les atomes de carbone disposés en hexagones sont remplacés par d'autres éléments capables eux aussi de se tenir dans la même configuration *bidimensionnelle et d'exhiber de nouvelles caractéristiques*. On a même commencé à déposer une monocouche sur l'autre, afin de combiner les propriétés et d'en obtenir de nouvelles.

Cette technique est d'ailleurs un des sujets de recherche d'Alberto Morpurgo. Lui et ses collègues travaillent en

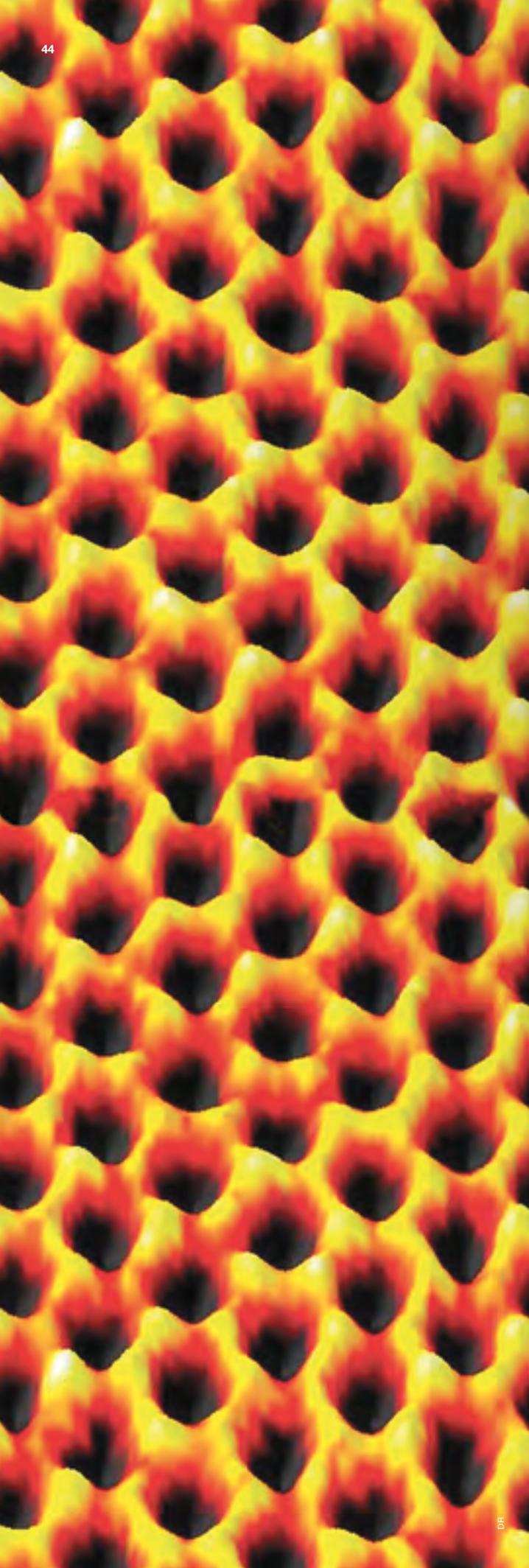
effet sur des structures bidimensionnelles capables d'émettre de la lumière ou, plus récemment, sur d'autres possédant des propriétés magnétiques inédites.

Dans un article publié le 3 février 2020 par la revue *Nature Materials*, il a notamment montré que la superposition de deux monocouches permettait d'obtenir des dispositifs capables d'émettre de la lumière, potentiellement « à la carte », c'est-à-dire de la couleur souhaitée, en choisissant les bons composants pour chacune des deux monocouches. Leur travail a aussi, et surtout, présenté une solution au problème de la superposition de deux feuilles de quelques angströms (dixièmes de

milliardième de mètre) d'épaisseur dont les mailles cristallines ne correspondent pas parfaitement ou qui sont légèrement décalées l'une par rapport à l'autre, ce qui aurait normalement pour résultat d'annihiler l'effet photoluminescent recherché.

« *Disposer de cette souplesse dans la conception de nouveaux matériaux représente un atout majeur dans une perspective*

ON LUI PROMET UN AVENIR RADIEUX COMME COMPOSANT ULTRALÉGER, SUPER-PILE, DÉTECTEUR CHIMIQUE HYPERSENSIBLE, TRANSISTOR EXTRA-RAPIDE OU ENCORE DANS LA FABRICATION D'ÉCRANS TACTILES FLEXIBLES



Le graphène, vu ici au microscope à champ proche, est composé d'une monocouche d'atomes de carbone, disposés selon une maille hexagonale.

LES PROMESSES DU GRAPHÈNE

Découvert en 2004, le graphène a provoqué un engouement tel qu'en 2013, l'Union européenne a lancé le Graphene Flagship, doté d'un budget d'un milliard d'euros sur dix ans. Ce projet, le premier de ce type, a été conçu, entre autres, pour éviter de se faire distancer sur le plan industriel, notamment par la Chine et la Corée du Sud, où la plupart des brevets dans ce domaine ont à ce jour été déposés. Le succès semble être au rendez-vous. En février de cette année, le consortium européen a annoncé la mise en place d'une ligne de production capable de fabriquer des films de graphène sans défauts de 30 centimètres de diamètre, prêts à être intégrés sur des plaques de silicium cristallin destinées aux circuits intégrés. Selon son rapport d'activité 2020, soit trois ans avant la conclusion du programme, le Graphene Flagship affirme également avoir donné naissance à environ 90 produits intégrant le graphène d'une manière ou d'une autre, avec des applications aussi disparates que des capteurs à effet Hall (permettant de mesurer les champs magnétiques et l'intensité des courants électriques) dix fois plus sensibles que leurs homologues en silicium ou des écouteurs aux aigus et basses améliorés. Parmi les autres produits de niche, on trouve aussi un pneu de vélo ayant une

excellente adhérence, une raquette de tennis à flexibilité et durabilité supérieures, un casque de moto capable de disperser les impacts avec grande efficacité ou encore un climatiseur à haute performance. Le Flagship a également lancé les projets « Spearhead » (fer de lance), dont le but est de mettre au point des prototypes utilisant le graphène pour des applications commerciales. Conformément aux Objectifs de développement durable des Nations unies, ces projets comprennent l'utilisation de produits à base de graphène pour contribuer à la santé et au bien-être, à la production d'eau potable et d'une énergie propre et abordable, à des villes et des communautés durables, ainsi qu'à l'amélioration de l'innovation industrielle et des infrastructures en Europe.

<https://graphene-flagship.eu>

industrielle, explique le professeur genevois. *En termes de coûts et d'efficacité, il est en effet préférable d'avoir une certaine tolérance dans le processus de fabrication afin de ne pas risquer de perdre à la moindre imprécision les propriétés désirées, si fragiles par essence car dépendantes de paramètres réglés à l'échelle atomique.* »

Les sauts des électrons Il existe déjà dans le commerce des matériaux capables d'émettre de la lumière. Il s'agit de semi-conducteurs, utilisés dans des secteurs aussi divers que les télécommunications, les LED présents dans de nombreux appareils quotidiens (ampoules économiques, éclairage public, écrans plats...) ou le diagnostic dans le secteur médical. Ces dispositifs électroluminescents exploitent le fait que dans ces matériaux, les électrons peuvent sauter d'un niveau d'énergie élevé à un autre plus bas et émettre en même temps un grain de lumière dont la longueur d'onde (couleur) correspond exactement à la différence d'énergie des deux niveaux.

Mais seuls certains matériaux peuvent faire l'affaire. Et toutes les longueurs d'onde ne sont pas disponibles.

Les matériaux bidimensionnels tels que le graphène et ses dérivés représentent donc une solution élégante à cette limitation. Ces cristaux parfaits, une fois empilés, se comportent en effet comme des semi-conducteurs « artificiels » dont les niveaux d'énergie peuvent être contrôlés en sélectionnant la composition chimique et l'épaisseur des matériaux formant la structure.

Les premiers semi-conducteurs artificiels ont été réalisés il y a quatre ou cinq ans. Au début, pour que le dispositif émette de la lumière, il fallait que les deux cristaux 2D aient la même structure cristalline et que les atomes soient tous parfaitement alignés. Des conditions très strictes et rarement remplies.

Pour dépasser cette limitation, l'équipe d'Alberto Morpurgo a exploité deux propriétés issues de la physique

quantique. La première consiste à se passer des liaisons chimiques covalentes (obtenues par échange d'électrons), qui maintiennent fermement deux couches mono-atomiques ensemble, et d'utiliser à la place la force de Van der Waals. La faible intensité de cette interaction électrique qui agit directement entre deux atomes dès qu'ils sont assez proches permet aux deux couches de coulisser et

de tourner plus facilement l'une par rapport à l'autre.

La seconde propriété est plus technique et vise à trouver une classe de matériaux pour laquelle la « quantité de mouvements » des électrons avant et après le passage d'un niveau d'énergie à l'autre est nulle. Ce cas de figure idéal satisfait toujours les conditions nécessaires pour l'émission de lumière, indépendamment des détails des réseaux cristallins et de leur orientation relative.

Et il se trouve qu'il existe un grand nombre de matériaux répondant à ces deux exigences. « Dans notre recherche, nous avons utilisé du séléniure d'indium (InSe) sur lequel nous avons déposé différentes dichalcogénures de

métaux de transition (des matériaux à base de molybdène ou de tungstène), explique Alberto Morpurgo. Par la suite, nous avons identifié de nombreux autres composés qui pourraient être utiles pour élargir la gamme de couleurs de la lumière émise par ces nouveaux semi-conducteurs artificiels. Nous proposons ainsi de nouvelles stratégies pour manipuler cette lumière comme bon nous semble, avec l'énergie et la couleur que l'on souhaite obtenir. »

TOUTES LES LONGUEURS D'ONDE NE SONT PAS DISPONIBLES. LES MATÉRIAUX TELS QUE LE GRAPHÈNE REPRÉSENTENT UNE SOLUTION ÉLÉGANTE À CETTE LIMITATION



SUR LES TRACES DU TEMPLE PERDU D'ARTÉMIS

CONNU DEPUIS L'ANTIQUITÉ COMME UN IMPORTANT LIEU DE CULTE, LE TEMPLE D'ARTÉMIS SITUÉ SUR L'ÎLE D'EUBÉE A LONGTEMPS ÉCHAPPÉ AUX ARCHÉOLOGUES. LOCALISÉ EN 2007, IL A LIVRÉ L'AN DERNIER **UNE QUANTITÉ EXCEPTIONNELLE DE TROUVAILLES.**

Des bijoux en or et en argent, des pierres semi-précieuses, des vases décorés, des figurines en terre cuite, des armes, un casque et un bouclier en bronze : la campagne de fouilles menée cet été par l'École suisse d'archéologie en Grèce (Esag) sur le site d'Amarynthos, où a été identifié en 2007 un sanctuaire dédié à la déesse Artémis, a donné lieu à une série de découvertes tout à fait exceptionnelles. D'autant que sous ce dépôt d'offrandes comprenant quelque 600 objets, les archéologues conduits par Tamara Saggini, doctorante au Département des sciences de l'Antiquité de la Faculté des lettres qui vient de rejoindre l'UNIL pour y terminer sa thèse, ont mis au jour les fondations d'un second temple, plus ancien, attestant de l'importance de ce lieu de culte ausculté depuis une vingtaine d'années par les chercheurs et chercheuses de l'Esag à qui l'on doit sa récente découverte. Connue par plusieurs sources grecques et latines, le sanctuaire d'Artémis Amarysia constituait l'un des plus importants lieux sacrés de l'île d'Eubée. Chaque année, on s'y rassemblait pour assister à la fête des Artemisia donnée en l'honneur de la déesse protectrice de la ville antique d'Érétrie. C'est

là également qu'étaient exposés les documents publics les plus importants.

Alors que la quasi-totalité des édifices du même genre a été explorée dès le XIX^e siècle, il a toutefois fallu attendre les années 2000 pour retrouver la trace de l'Artémision d'Amarynthos.

Aux dires du géographe et historien grec Strabon (60 av. J.-C. – 20 ap. J.-C.), celui-ci se trouvait en effet à environ sept stades, soit un peu plus d'un kilomètre, des murs de la cité d'Eubée. Les sondages effectués dès le début du XX^e siècle dans ce périmètre, notamment par des équipes américaines, n'ont cependant livré aucun résultat probant.

La coquille du copiste C'était sans compter avec la sagacité du professeur Denis Knoepfler, épigraphiste exerçant ses talents à l'Université de Neuchâtel et au sein de l'Esag, qui réalisa au début des années 1970 que ces échecs répétés sont peut-être dus à l'erreur d'un copiste au moment où les nombres écrits en chiffres grecs ont été transcrits en lettres alphabétiques byzantines. Il en conclut que le texte original de la *Géographie de Strabon* devait mentionner une distance de 60 stades et non de sept. Reste à valider cette hypothèse, ce qui sera fait



Le site d'Amarynthos durant la campagne de fouilles 2021.

en 2007, grâce à la découverte d'une première série de vestiges sur le site fouillé aujourd'hui encore par l'Esag, puis, dix ans plus tard, par celle d'inscriptions et de tuiles estampillées au nom d'Artémis.

« IL A FALLU AVANCER PAS À PAS PARCE QUE LE TERRAIN ÉTAIT EN GRANDE PARTIE CONSTRUIT »

« À partir de cette date, l'Esag, en collaboration avec le Service archéologique grec, a décidé de lancer une fouille extensive du périmètre, explique Tamara Saggini. Il a cependant fallu avancer pas à pas parce que le terrain était en partie construit. Plusieurs maisons ont ainsi été rache-tées. Certaines ont été détruites pour laisser la place aux fouilles mais trois d'entre elles ont été conservées en vue de loger les étudiant-es qui rejoignent les lieux chaque été. »

Familière de l'endroit, qu'elle fréquente depuis 2010, la jeune femme, qui a appris le grec au fil de ses séjours sur le terrain, avait cette année la lourde responsabilité de diriger les opérations sur le chantier.

Des tests et des flammes Même si l'archéologie de terrain est longtemps restée un bastion masculin, Tamara Saggini n'a rencontré aucune difficulté liée à son genre au cours de l'exercice. Par contre, il a fallu composer avec les conditions sanitaires liées à la pandémie de covid. Tout le personnel présent sur le chantier a ainsi été régulièrement testé, les sorties en ville ont été réduites au strict minimum et la plupart des excursions

organisées habituellement pendant les week-ends ont été annulées.

« Fort heureusement, personne ne s'est révélé positif, parce que, dans le cas contraire, le Service archéologique grec nous aurait probablement obligés à fermer le chantier, précise la chercheuse. Mais le fait d'avoir cette épée de Damoclès constamment au-dessus de nos têtes nous a placés dans une situation d'incertitude permanente qui n'a pas toujours été facile à gérer.



Amarynthos

Village situé sur l'île d'Eubée, deuxième des îles grecques après la Crète par la superficie. Le site du temple d'Artémis est situé aux abords du village, sur le promontoire de Palæoekklisies.

Population:
4141 habitant-es

Altitude: 11 mètres



L'ambiance était un peu plus tendue que d'habitude à cause de ce sentiment d'enfermement, mais au final tout le monde a joué le jeu.»

Les feux de forêts qui se sont déclarés dans le nord de l'île ont encore ajouté une dose d'étrangeté à cette configuration déjà particulière. Même si le site de fouilles n'a jamais été directement menacé par les flammes, les retombées de cendres et la fumée qui donnaient au ciel une couleur jaune-orange ont plongé l'ensemble de l'équipe dans une atmosphère un brin apocalyptique.

Quarante baignoires au tamis Face à des circonstances aussi contraires, la campagne aurait très bien pu tourner au fiasco. C'est pourtant tout le contraire qui s'est produit, puisque ces six semaines de travail sur le terrain ont débouché sur une moisson dépassant de loin les espérances des archéologues. Confirmant définitivement la présence d'un sanctuaire, un dépôt d'offrandes comprenant près de 600 pièces dont l'inventaire

n'est à ce jour pas encore tout à fait achevé a en effet été mis au jour.

Un véritable trésor, dans lequel on trouve notamment des vases en céramique peints (dits «vases à figure noire»), de nombreux récipients utilisés soit pour aller chercher de l'eau soit pour contenir des huiles parfumées ou comestibles, ainsi que des vases miniatures traditionnellement associés à des pratiques rituelles.

Plus rares, parce que généralement refondus avant leur redécouverte, des vases en bronze, qui devaient vraisemblablement servir à des libations, ont également été découverts. De même qu'une vaste série de bijoux en or, en argent, en ambre et en faïence, complétés par des perles devant appartenir à l'origine à des boucles d'oreilles ou à des colliers.

«Il est également peu fréquent de retrouver ce type d'objets, précise Tamara Saggini, parce que cela implique une fouille très fine compte tenu de la taille réduite des fragments qui, pour certains, ne dépassent pas 2 millimètres. Dans le cas présent,

nous avons passé l'équivalent d'une quarantaine de baignoires au tamis pour obtenir ce résultat.»

Connues jusqu'ici uniquement par le biais de collections privées ou sous forme de fragments, une vingtaine de figurines en terre cuite fabriquées à partir d'une plaque en terre cuite sur laquelle une tête produite dans un moule a été appliquée figurent par ailleurs à l'inventaire.

Les restes de ce qui devait être des lances mais que la corrosion a considérablement déformés, ainsi qu'un casque et un bouclier de bronze très bien conservés, soit deux objets exceptionnels, ont aussi été dégagés. Enfin, l'équipe a mis la main sur les vestiges d'un coffret de bois serti de bronze et muni d'appliques de fer et d'ivoire sur lesquelles des fibres de tissu ont pu être identifiées en laboratoire.

Cerise sur le gâteau, les traces d'un édifice datant de l'âge de l'époque géométrique, soit le VIII^e siècle av. J.-C., sont apparues sous le dépôt d'offrandes, donnant le coup d'envoi à

Vase de type lécythe à figures noires découvert sur le site d'Amarynthos.

un nouveau projet scientifique financé par le Fonds national suisse jusqu'en 2025.

Introuvable Artémis Cependant nulle trace de la statue d'Artémis, qui devait logiquement trouver place dans le fond du temple, n'a pour l'instant pu être repérée.

« Sur ce point, différentes hypothèses sont imaginables, explique Tamara Saggini. Si la statue était en bronze, elle a sans doute été refondue et il n'en reste plus rien depuis longtemps. Si elle était en bois, la décomposition aura fait son œuvre au fil du temps et il n'y a aucune chance non plus qu'elle soit parvenue jusqu'à nous. Si elle était en marbre, elle peut soit avoir été détruite dans un four à chaux, pratique qui était assez courante à l'époque romaine, soit se trouver dans une zone qui n'a pas encore été explorée. »

En attendant d'en avoir le cœur net, Tamara Saggini et ses collègues de l'Esag ont encore pas mal de pain sur la planche. Il s'agira tout d'abord de traiter le matériel recueilli de manière approfondie en tirant profit des technologies numériques pour tenter de mieux comprendre ce qui s'est réellement passé il y a près de 2600 ans dans ce sanctuaire.

Restaurer et valoriser *« Quand on essaie de lire des cahiers de fouilles rédigés dans les années 1960, un des problèmes que l'on rencontre, c'est qu'ils sont difficiles à déchiffrer et en général beaucoup plus sommaires et qu'il est par conséquent compliqué de faire des recoupements entre les différents documents, note la spécialiste. En travaillant avec des tablettes et des appareils photo numériques, comme on le fait aujourd'hui, on amasse certes une quantité de données phénoménale, mais celles-ci peuvent être enregistrées dans un système unique qui permet de relier toutes ces informations entre elles. On peut ensuite s'en servir pour retrouver facilement tous les objets du même type ou tous ceux qui ont été retrouvés à la même profondeur. Ces données peuvent par ailleurs être utilisées pour le catalogage ou la publication, tout en étant accessibles à l'ensemble de la communauté scientifique. »*

« LES HABITANTS D'AMARYNTHOS SE SONT MOBILISÉS POUR DEMANDER LA CONSTRUCTION D'UN NOUVEAU MUSÉE SUR PLACE »

Un autre chantier d'importance concerne la valorisation des trouvailles effectuées sur le site. Outre la restauration des objets à proprement parler, travail qui devrait s'étaler sur plusieurs années compte tenu des forces actuellement à disposition, se pose en effet la question du devenir de ces vestiges. Les vitrines du musée d'Érétrie étant d'ores et déjà pleines à craquer, il faudrait faire du tri et imaginer une nouvelle présentation pour intégrer les pièces les plus récentes. Un procédé qui, là encore, s'annonce long et compliqué sur le plan administratif. *« De leur côté, les habitants d'Amarynthos se sont mobilisés pour demander la construction d'un nouveau musée sur place, complète Tamara Saggini. Cette initiative n'a toutefois guère de chances d'aboutir. D'une part, à cause de la proximité du musée d'Érétrie, situé à quelques kilomètres seulement. D'autre part, parce que les ressources que suppose un tel projet font actuellement défaut tant sur le plan humain qu'en termes économiques. »*

Négocier plutôt qu'exproprier Pour être à même de compléter le plan du sanctuaire, il faudra également trouver un moyen d'élargir encore le périmètre de fouilles, sachant qu'une maison de vacances se trouve exactement dans

l'axe privilégié par les chercheurs pour poursuivre leurs investigations. Les négociations en cours, menées avec l'appui des autorités grecques, n'ont pour l'heure donné aucun résultat mais la situation n'est pas pour autant sans espoir.

« Notre but est évidemment de conserver de bonnes relations avec la population locale, développe la spécialiste. Dans le cas présent, l'idée est de parvenir à un accord sans en arriver à une procédure d'expropriation, procédure que nous serions parfaitement en droit de lancer d'un point de vue strictement juridique. »

Restée quelques semaines sur place afin de traiter le matériel et les données accumulées durant l'été, Tamara Saggini sera, quoi qu'il arrive, au rendez-vous l'an prochain pour une nouvelle campagne de fouilles, puisqu'elle assumera la publication du matériel archaïque du temple dans le cadre du projet financé par le FNS. Dans l'intervalle, elle devrait avoir trouvé le temps de mettre la dernière main à une thèse de doctorat entamée sous la direction de Lorenz Baumer, professeur au Département des sciences de l'Antiquité de la Faculté des lettres, et qui porte sur l'étude de la céramique grecque des VI^e et V^e siècles av. J.-C. à partir du matériel exhumé par l'École suisse d'archéologie depuis le début des travaux sur le site de la ville voisine d'Érétrie.

Vincent Monnet

LE CHANT DU SIGNE

IRENE STRASLY S'EST VU DÉCERNER LA MÉDAILLE DE L'INNOVATION DE L'UNIVERSITÉ LORS DU DERNIER DIES ACADEMICUS. UNE RÉCOMPENSE QUI SALUE LA MISE EN PLACE DE PLUSIEURS **FORMATIONS ACADÉMIQUES À DESTINATION DES PERSONNES SOURDES ET MALENTENDANTES**. PORTRAIT

On dit souvent des Italiens qu'ils parlent avec les mains. C'est on ne peut plus vrai dans le cas d'Irene Strasly. Originnaire du Piémont, cette chercheuse affiliée au Département de traitement informatique multilingue de la Faculté de traduction et d'interprétation (FTI) est en effet une spécialiste reconnue de la traduction de la langue des signes vers des langues vocales telles que le français ou l'italien. Un savoir qui a tendance à devenir de plus en plus précieux compte tenu d'une demande en forte augmentation pour ce type de prestation et qu'elle entend bien partager aussi largement que possible. C'est dans cette optique que la jeune femme s'est engagée dans la coordination de plusieurs nouveaux programmes de formation universitaire basés sur l'utilisation de la langue des signes et ne connaissant actuellement pas d'équivalent en Suisse romande. Une initiative saluée par la Médaille de l'innovation de l'Université, distinction remise à Irene Strasly le 15 octobre dernier lors de la cérémonie du Dies academicus qui – pour la première fois – a été intégralement traduite en langue des signes.

Le tournant de Milan L'introduction officielle de la langue des signes dans un cursus académique constitue, à elle seule, un joli pied de nez à l'histoire. Dans la plupart des pays européens, son usage a en effet été proscrit de l'école durant près d'un siècle à la suite du Congrès de Milan en 1880. Aux yeux des délégués présents lors de cette réunion, ce mode de communication avait le tort « de ne

pas constituer une véritable langue, de ne pas permettre de s'adresser à Dieu ou encore de favoriser la tuberculose en empêchant le locuteur de respirer convenablement » (sic). Durant des décennies, la langue des sourds a ainsi été condamnée à la clandestinité, sa pratique se limitant à la sphère privée et aux milieux associatifs.

DANS LA PLUPART DES PAYS EUROPÉENS, L'USAGE DE LA LANGUE DES SIGNES A ÉTÉ PROSCRIT DE L'ÉCOLE DURANT PRÈS D'UN SIÈCLE

« La réalité de la surdité a fort heureusement beaucoup évolué au cours des dernières décennies, note la spécialiste. Depuis les années 1980, de nombreux États ont reconnu la langue des signes comme une langue à part entière. Et aujourd'hui, même si la situation n'est pas idéale, d'importants efforts sont consentis pour favoriser l'accès des sourd-es et des personnes malentendantes aux informations liées à leur vie quotidienne. Le problème, c'est qu'il n'y a pas assez de gens formés pour répondre à l'ensemble de ces besoins. »

Actuellement, on dénombre en effet une trentaine d'interprètes pour l'ensemble de la Suisse romande, ce qui est bien trop peu pour

répondre aux demandes simultanées de la Confédération, qui a multiplié les messages de prévention en langue des signes durant la récente pandémie de covid, de la Radio télévision suisse (RTS), qui s'est engagée à proposer davantage de programmes accessibles aux sourd-es et aux malentendant-es, ou encore des Hôpitaux universitaires de Genève (HUG), qui sont en train de développer un système de traduction automatique du discours médical vers des langues minoritaires, dont la langue des signes. Le tout sans compter le fait que les personnes sourdes et malentendantes ont en principe le droit d'exiger la présence d'un interprète lorsqu'elles sont confrontées à une urgence médicale ou à des difficultés avec l'administration.

Méthodologie de haut niveau

D'où l'intérêt des deux nouvelles formations proposées par l'Université. Intégrée au baccalauréat en communication multilingue depuis la rentrée de septembre, la première permet aux étudiant-es dont le français est la langue active – soit celle vers laquelle ils traduisent – de choisir la langue des signes comme langue passive, en plus de l'allemand, de l'anglais, de l'italien, de l'espagnol ou du russe.

Comme c'est le cas pour les autres idiomes, les candidats doivent toutefois posséder des bases en langue des signes pour pouvoir prétendre à intégrer ce cursus étalé sur trois ans et financé pour les cinq prochaines années

Irene Strasly signe le mot «langue» devant l'objectif de notre photographe.

Bio express

1988 : Naissance à Turin.

2007 : Intègre la Faculté de traduction et d'interprétation de l'UNIGE (FTI).

2010 : Entame l'apprentissage de la langue des signes française et de la langue des signes de Suisse romande.

2013 : Maîtrise en traduction spécialisée à la FTI.

2015 : Certificat d'interprète en langue des signes italienne.

2017 : Obtient une bourse doctorale du FNS pour la poursuite de sa thèse.

2017 : Lauréate de la Médaille de l'innovation de l'UNIGE.





KEYSTONE

par la Fédération suisse des sourds et Procom, une fondation qui emploie des interprètes de langue des signes à l'échelle nationale.

Reposant sur une méthodologie de haut niveau, ce programme – qui sera enrichi à partir de 2023 d'un volet consacré à la langue des signes italienne – ne suffira toutefois pas à devenir interprète à part entière.

« Ce baccalauréat constitue une première étape, confirme Pierrette Bouillon, doyenne de la FTI et codirectrice, depuis sa création en 2017, du Centre de recherche suisse pour une communication sans barrière. Et pour l'instant, les étudiant-es qui souhaiteraient se former à l'interprétation en niveau master devront se rendre en France. »

Les personnes d'ores et déjà titulaires d'un diplôme en traduction et interprétation qui seraient intéressées par cette filière pourront, quant à elles, s'inscrire à un certificat de communication en langue des signes d'une durée de trois ans alternant enseignements spécifiques sur la langue des signes et cours à option. Destiné cette fois spécifiquement aux personnes sourdes et malentendantes qui souhaitent devenir traductrices professionnelles, le second programme se présente sous la forme d'un Diplôme d'études avancées (DAS)

en langue des signes dispensé dans le cadre de la formation continue. Accessible à partir du mois de février 2022, ce cursus débouchera sur un travail de mémoire et ouvrira à ses participant-es les portes des associations professionnelles réparties sur l'ensemble du territoire national. Faute de personnel formé en Suisse, l'enseignement sera donné par des professionnels sourds qui travaillent actuellement en France ou en Italie. Concrètement, les deux premiers semestres sont dédiés à l'acquisition des techniques de base de la traduction générale, tandis que la deuxième année est centrée sur la traduction audiovisuelle, la RTS, la RSI et Swiss TXT mettant gracieusement leurs locaux à disposition pour l'occasion.

« Outre les complications qu'elles rencontrent pour accéder aux services publics au sens large, les personnes sourdes ou malentendantes sont également défavorisées sur le plan de l'éducation, explique Irene Strasly. Elles ont souvent des difficultés avec la langue écrite, ce qui pousse la plupart d'entre elles à se diriger vers un apprentissage, par exemple dans le domaine de l'horlogerie, parce qu'elles sont précises et méticuleuses, en général. Avec cette formation, qui prend en compte l'expérience professionnelle, on espère pouvoir élargir leur accès au monde universitaire. A

terme, j'aimerais d'ailleurs bien travailler avec une personne sourde qui pourrait être issue de ce programme et qui pourrait m'épauler. C'est important que nous puissions travailler ensemble, notamment pour que les projets que nous menons soient acceptés par la communauté des sourds. »

De la grâce et des glaces Née en 1988 dans un village de la campagne turinoise, Irene Strasly ne semblait en rien prédestinée pour suivre un tel parcours. Élevée par une mère employée de banque et un père photographe aux côtés d'un frère de trois ans son cadet, elle traverse sa scolarité sans grande difficulté, manifestant un goût précoce pour les langues qui lui donne très tôt l'envie d'œuvrer dans les métiers de la traduction et de l'interprétation à Genève.

Avant d'intégrer la Faculté de traduction et d'interprétation, dont une enseignante lui a vanté les qualités, ses seuls contacts avec le monde des sourds se limitent aux émissions interprétées en langue des signes qui passent à la télévision et à la fréquentation hebdomadaire d'un groupe de sourds qui viennent se restaurer dans la glacerie où elle travaille en parallèle à ses études. « Il y avait quelque chose qui me fascinait dans cette gestuelle,

Malgré l'absence de statistiques officielles, on estime qu'il y a environ 10 000 personnes sourdes profondes en Suisse, ce qui représente 0,1 % de la population. S'y ajoutent près d'un million de personnes malentendantes, chiffre en constante progression compte tenu du vieillissement de la population.

explique-t-elle. *Une sorte de grâce qui me faisait penser que c'était une belle langue.* »

Ce n'est toutefois qu'au moment de son arrivée à Genève, en 2007, qu'elle se décide à franchir le pas, un peu par hasard, un peu par curiosité. *« Inscrite en traduction spécialisée, je ressentais le besoin d'apprendre l'allemand, une langue qui m'aurait ouvert plus de portes au niveau professionnel, précise-t-elle. Je me suis donc lancée dans cette voie jusqu'à ce que je tombe sur une brochure évoquant des cours en langue des signes. Cela a été une sorte de déclic. J'ai aussitôt abandonné l'allemand pour me consacrer à l'étude de cette langue. »*

Plongée en « pays sourd » Commencé en 2010, l'apprentissage débute entre Genève et Lausanne, avant de passer par Paris pour une série de stages intensifs. Il est bientôt complété par de fréquents séjours à Bologne afin de maîtriser les spécificités propres à la langue des signes transalpine.

« Lorsqu'on veut apprendre l'anglais ou l'allemand, on peut se rendre sur place et s'immerger dans la langue et la culture locales pour faciliter l'apprentissage, commente la principale intéressée. Mais comme il n'y a pas de pays sourd, c'est plus compliqué pour la langue des signes. Si on veut parvenir à une certaine aisance et être au clair avec les références propres à chaque communauté, il n'y a pas d'autre choix que de s'investir dans des activités associatives et de participer à des événements (rencontres, festivals) organisés par et pour des sourds. »

De même que toutes les langues orales, la langue des signes est en effet en constante évolution. Outre les particularités locales, le lexique s'enrichit régulièrement de nouveaux termes pour lesquels il s'agit de trouver une façon de signer appropriée. Le récent mouvement *Black Lives Matter* a, par exemple, donné lieu à un vaste débat destiné à déterminer la meilleure façon de signer le mot « noir », tandis que depuis quelques années, on ne signe plus le mot « téléphone » en ouvrant le pouce et l'auriculaire avant de diriger la main vers l'oreille,

mais en reproduisant le geste du déroulement utilisé communément sur les écrans tactiles (*scroll*).

Son diplôme de maîtrise en traduction spécialisée achevé, Irene Strasly obtient un poste d'assistance à la FTI. En marge de ses charges de cours et d'une thèse de doctorat qu'elle choisit de consacrer aux personnes sourdes qui traduisent des textes du français écrit vers la langue des signes (travail encore en cours aujourd'hui), elle s'engage dans divers projets liés à la langue des signes, à la technologie et à l'accessibilité.

Outre une participation active au développement du Centre suisse pour une communication sans barrière, elle coordonne ainsi, également en collaboration avec la professeure Pierrette Bouillon, le projet *Trainslate*. Celui-ci vise à traduire les annonces vocales dans les gares de Suisse Romande en langue des signes à l'aide d'un avatar virtuel.

« Ce type d'outils a déjà été mis en place dans des pays comme la France et l'Autriche, précise Irene Strasly. C'est un système flexible et relativement peu coûteux puisqu'il est possible d'utiliser un avatar déjà existant. Sa mise en place aurait évité à pas mal de sourds de se retrouver dans le mauvais train ou d'arriver à un autre endroit que la destination prévue parce qu'ils ou elles n'ont pas eu accès à la bonne information, mais le projet a malheureusement été suspendu en 2020. »

Dans un registre similaire, Irene Strasly est aussi impliquée dans le projet *Babel Dr*, un système innovant de traduction automatique du discours médical vers des langues peu pratiquées dans le milieu hospitalier comme le dari, le tigrinya, l'arabe, l'albanais, l'espagnol, le farsi et, depuis 2017, la langue des signes. Porté par les Hôpitaux universitaires de Genève et la Faculté de traduction et d'interprétation, le projet repose sur le développement d'un logiciel utilisant la reconnaissance vocale pour identifier et traduire au patient les questions du médecin.

« Cet outil vise à donner un premier diagnostic au patient, précise la chercheuse. Il est extrêmement utile dans le cas de personnes sourdes car pour ces dernières, l'hôpital est en général un lieu hautement inaccessible. D'ordinaire, quand ils arrivent aux urgences, ils ne comprennent pas ce qui se passe et personne n'a beaucoup de temps à disposition pour tenter de leur expliquer. Ils repartent donc souvent sans avoir compris en profondeur la nature de leur problème. »

À la table du silence Parallèlement à ses activités académiques, Irene Strasly a également trouvé le moyen de donner un peu de son temps à l'association *Signons ensemble*, qui propose des ateliers de langue des signes aux familles ne connaissant pas de problème d'audition et souhaitant développer une communication positive avec leurs jeunes enfants. *« L'idée, c'est que l'enfant puisse utiliser certains signes avant d'être en capacité de parler, complète la spécialiste. Il peut ainsi manifester son envie de manger, de boire, de dormir ou de prendre un bain, ce qui tend à diminuer les frustrations, non seulement chez l'enfant, mais aussi chez les parents. C'est une méthode qui nécessite un peu de temps d'apprentissage mais qui donne de très bons résultats et qui est de plus en plus répandue dans les crèches et au sein des familles. »*

Toujours de manière bénévole, elle tient le rôle de secrétaire pour le compte de la Société des sourds de Genève et donne divers coups de main à l'équipe du *Vroom*. Ce restaurant, dont la gestion et le service seront entièrement assurés par des personnes sourdes ou malentendantes, devrait ouvrir ses portes début 2022 à Genève et sera le premier établissement du genre en Suisse.

Dans l'intervalle, que vous soyez sourd ou non, Irene Strasly sera sans doute ravie de vous recevoir pour une petite séance de thérapie par le son, puisqu'elle s'est lancée depuis quelques années dans un master en harpe-thérapie au sein d'une école de Milan. À bon entendeur...

Vincent Monnet

À LIRE

L'HISTOIRE OUBLIÉE DES ENFANTS PLACÉS

Entre 1870 et 1980, des dizaines de milliers d'enfants et d'adolescent-es ont été retiré-es à leurs parents par les autorités suisses pour être placé-es en famille d'accueil ou en institution. L'idée qui prévaut aux yeux des élites tout au long de cette période, c'est qu'il faut préserver la santé et l'instruction de ces enfants, qui constituent un capital précieux pour l'avenir de la nation, en

les éloignant de leur milieu familial jugé comme déficient pour cause de pauvreté, de marginalisation ou de comportements contraires aux normes morales de la bonne bourgeoisie. Faute de moyens financiers, c'est aux réseaux de charité privés qu'incombe la mise en place d'institutions éducatives destinées à « réformer » ces rejets des classes populaires sorties du droit chemin. En famille d'accueil ou au sein d'établissements fermés, ceux-ci sont certes nourris, logés et instruits, mais les dérives sont fréquentes : travaux harassants, humiliations, violences ou abus sexuels s'ajoutent à une solitude affective très largement partagée. Même si l'efficacité du dispositif

est très vite remise en cause, notamment au vu du très grand nombre de cas de récidence, il faudra pourtant des décennies pour changer de paradigme. Et ce n'est qu'au cours des années 1970 que le

modèle tutélaire et autoritaire qui avait prévalu jusque-là est abandonné au profit d'une approche centrée sur les besoins des mineur-es et prenant en considération les familles en vue d'en faire des partenaires à part entière du projet éducatif, lequel vise désormais à maintenir aussi longtemps que possible l'enfant dans son milieu.

Mais si le placement devient dès lors l'exception plutôt que la norme, il faudra encore quelques décennies pour que le sujet soit débattu sur la place publique et commence à susciter l'intérêt des scientifiques. Depuis le début des années 2000, la recherche historique sur les placements d'enfants dans notre pays a toutefois connu d'importants développements dont cet ouvrage propose une synthèse éclairée. Un savoir précieux qui a sans nul doute contribué à décider la Confédération à présenter, en 2013, ses excuses officielles aux personnes concernées et à entamer un processus de réparation.

« **Placés, déplacés, protégés ? L'histoire du placement d'enfants en Suisse, XIX^e-XX^e siècles** », par Joëlle Droux et Anne-Françoise Praz, Éd. Alphil, 142 p.



AMIEL À L'ÉCOLE DES FEMMES

Professeur à l'Académie de Genève, où il a enseigné l'esthétique, la littérature puis la philosophie durant plus de trois décennies Henri-Frédéric Amiel (1821-1881) n'est pas entré dans l'histoire pour la grandeur de son parcours universitaire mais pour une œuvre tout à fait unique : un gigantesque journal intime de près de 17000 pages qu'il a tenu durant plus de quarante ans. C'est dans la jeunesse amoureuse de ce personnage réputé timoré et falot qu'a décidé de se plonger la journaliste et essayiste Corinne Chaponnière à l'heure où la planète s'est trouvée confinée. Sous sa plume, on suit donc les pérégrinations sentimentales du jeune étudiant, du doctorant, puis du professeur débutant qu'il devient en plein mitan du XIX^e siècle dans sa quête inachevée de l'âme sœur. En voyage dans les grandes capitales européennes, comme il se doit pour tout gentilhomme de l'époque, ou dans les rues de sa ville natale, il s'enflamme pour une cousine ou une connaissance, intrigue pour parvenir à ses fins, nourrit les espoirs les plus fous que fait naître la passion, avant, le plus souvent, de battre en retraite. C'est qu'il faut composer avec de nombreuses obligations et convenances – origine sociale, religion, réseaux familiaux et amicaux, statut professionnel – avant de pouvoir prétendre au mariage dans la Genève de ce temps-là. Or, le jeune Amiel est incapable de s'y résoudre tout à fait, préférant revenir à son journal pour y explorer par le menu, tel un personnage de Goethe, sa révolte et ses souffrances.

« **Seule une valse. Les souffrances du jeune Amiel** », par Corinne Chaponnière, Éd. Slatkine, 266 p.



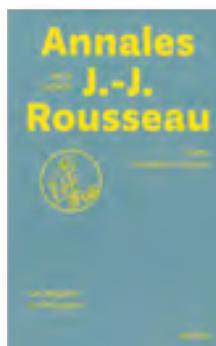
DES STÉRÉOTYPES DE GENRE À LA DISCRIMINATION SEXISTE

Celles et ceux qui désirent comprendre les mécanismes psychologiques menant à la discrimination sexiste, saisir l'impact de celle-ci sur les femmes – et sur les hommes – et se faire une idée des moyens disponibles pour la combattre, devraient apprécier la lecture de *Psychologie du sexisme, des stéréotypes du genre au harcèlement sexuel*. Codirigé par Klea Faniko, chargée de cours à la Faculté de psychologie et



des sciences de l'éducation, cet ouvrage regroupe le travail de 45 auteur-es comptant parmi les plus grands spécialistes francophones du domaine. Loin d'avoir disparu de notre société, comme l'ont montré de récents mouvements sociaux comme celui de #MeToo, la discrimination sexiste est le résultat d'une sorte de réaction en chaîne. L'être humain opère automatiquement une catégorisation sociale de son environnement. Il s'agit d'un phénomène de simplification naturel qui aide la lecture du monde mais il peut aussi déraiser. La catégorisation sociale basée sur l'appartenance sexuelle et de genre peut ainsi générer des stéréotypes qui influencent profondément les représentations des individus et peuvent ensuite se matérialiser dans des comportements réels menant aux discriminations sexistes. Cette réaction en chaîne n'est cependant pas une fatalité et peut être combattue. En revanche, cette lutte doit se faire avec tout le monde (hommes et femmes confondu-es) et à tous les niveaux : celui des individus, celui du milieu professionnel et celui de la société tout entière, notamment en empêchant autant que possible la diffusion des stéréotypes de genre dans la petite enfance, l'enseignement, l'espace public, etc. AV

«*Psychologie du sexisme, des stéréotypes du genre au harcèlement sexuel*», ouvrage collectif sous la direction de Klea Faniko et Benoît Dardenne, Éd. De Boeck supérieur, 2021, 260 pages



DU NOUVEAU POUR ROUSSEAU

Les *Annales* de la société J.-J. Rousseau font peau neuve. Portées par une équipe rajeunie et féminisée, elles s'organisent désormais autour d'une thématique – la religion pour ce 54^e opus – enrichi par des contributions reflétant l'actualité de la recherche sur l'illustre «citoyen de Genève».

«*Les religions de Rousseau. Annales de la Société J.-J. Rousseau, T. 54*», par Martin Rueff (dir.), Éd. Georg, 438 p.



LA CROIX ET LA PLUME

Enseignante, poète, dramaturge et essayiste, Sylviane Dupuis explore les traces plus ou moins explicites des Écritures saintes dans l'œuvre de quelques grandes figures de la littérature romande telles que C.F. Ramuz, Blaise Cendrars, Corinna Bille, Catherine Colomb ou Nicolas Bouvier.

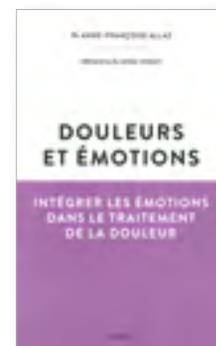
«*Au commencement était le verbe*», par Sylviane Dupuis, Éd. Zoé, 243 p.



LE SENS DU CULTE

Quel sens les grands courants protestants (luthériens et réformés) donnent-ils au culte divin ? Cet ouvrage collectif réunissant diverses auteur-es autour des enseignant-es de la Faculté de théologie s'arrête sur quelques moments de la liturgie pour en interroger le sens et la pertinence.

«*Le culte protestant. Une approche théologique*», par Christophe Chalamet et François Dermange, Éd. Labor et Fides, 242 p.



APPRIVOISER LA DOULEUR

Les douleurs chroniques frappent aujourd'hui plus de 20 % de la population adulte européenne. Destiné aux malades, à leurs proches ainsi qu'aux thérapeutes, cet ouvrage fait le point sur le sujet en mettant en évidence le rôle essentiel joué par les dimensions émotionnelles dans notre rapport à la souffrance.

«*Douleurs et émotions*», par Anne-Françoise Allaz, Éd. Vigot, 127 p.



INTIME?

22 OCTOBRE 2021 - 13 JANVIER 2022

Salle d'exposition de l'UNIGE

Boulevard Carl Vogt 66, 1205 Genève

unige.ch/-/intime

#unigexpo