

Des atomes réglés comme des horloges

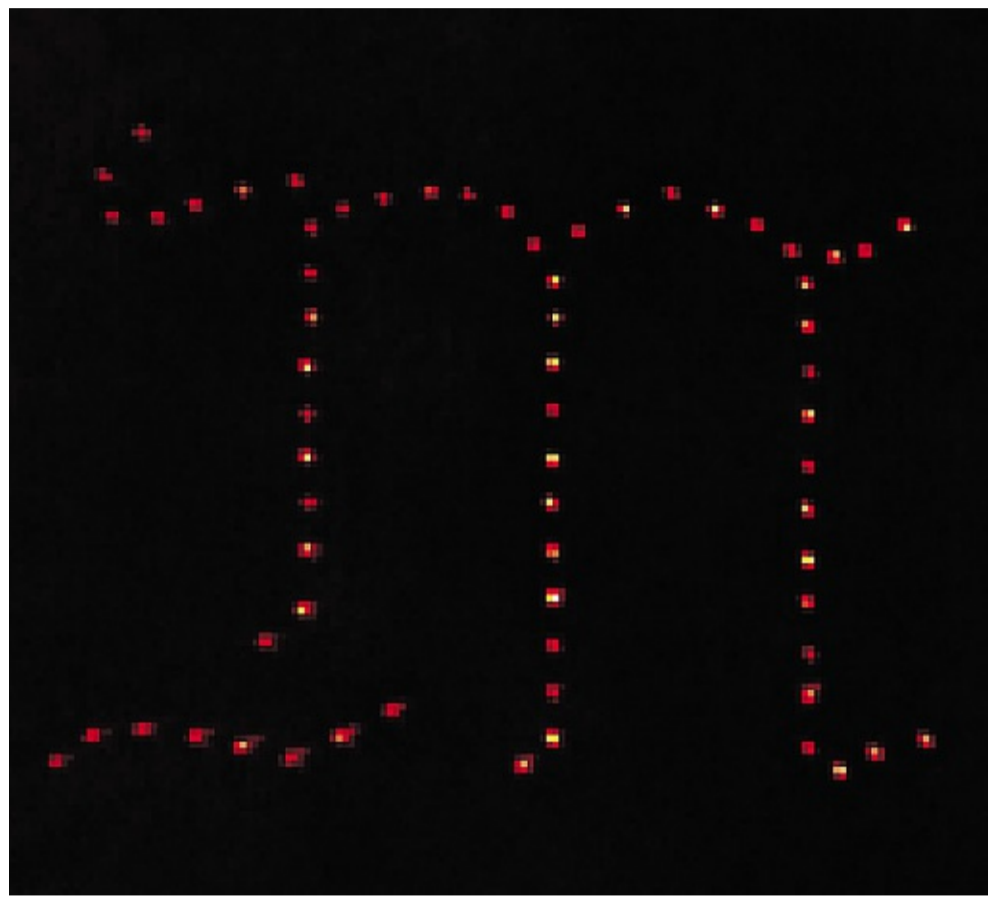
PHYSIQUE - Manipulant à volonté des atomes uniques, des chercheurs de l'Institut d'optique, à Palaiseau, ont constitué un simulateur du comportement quantique de la matière. Une étape vers de nouveaux calculateurs

Au sous-sol de l'Institut d'optique, à Palaiseau, devant son écran, Vincent Lienhard, en thèse dans ce laboratoire, clique avec sa souris sur les points d'une grille pour en mettre certains en vert et former la lettre « M ». Puis il lance son programme. Moins d'une seconde plus tard, sur une autre partie de l'écran, sur fond noir, un « M » apparaît, fait d'une soixantaine de petits pixels. A l'heure des prouesses du numérique, cette image floue peut sembler médiocre et d'un autre âge. Pourtant, c'est un exploit que seules une ou deux autres équipes dans le monde sont capables de faire. Chacun de ces petits points vacillant sur l'écran est en effet l'image d'un seul atome de rubidium en train d'émettre de la lumière et positionné à quelques micromètres de ses voisins. La position de cinquante de ces atomes est contrôlable d'un clic de souris pour former un carré, un cercle, un triangle... « On a même fait des caractères japonais », dit en souriant Antoine Browaeys, chercheur du CNRS et responsable de l'équipe.

Résoudre des équations compliquées

Ecrire et dessiner n'est pas le but de ces chercheurs. Ce qu'ils veulent, c'est construire un simulateur du comportement quantique de la matière, c'est-à-dire un outil permettant de résoudre les équations compliquées qui, à partir de la connaissance des interactions entre particules, expliquent par exemple les propriétés magnétiques ou électroniques d'un matériau. Or, ces dernières résistent encore aux théories. Même en simplifiant les situations, les physiciens calent, dès lors qu'un grand nombre de particules agissent l'une sur l'autre. « On peut faire un calcul sur le PC avec deux atomes en quelques secondes. Puis avec cinq ou six, pendant une pause déjeuner. Puis une quinzaine, pendant quelques jours... Mais très vite c'est impossible », explique Thierry Lahaye, autre chercheur du CNRS de l'équipe. Leur dernier article, mis en ligne sur Arxiv.org le 17 octobre, montre une adéquation excellente avec la théorie pour 25 particules, mais pousse le résultat jusqu'à 49, au-delà de ce que les ordinateurs peuvent calculer.

« Un simulateur est un peu comme une horloge astronomique du Moyen Âge qui permettait de prévoir les éclipses ou la position des planètes, sans résoudre les équations du mouvement », explique Thierry Lahaye. Etendre cette idée au monde quantique remonte aux années 1980 et au célèbre physicien Richard Feynman, qui avait suggéré d'utiliser des systèmes d'atomes ad hoc et de construire des situations analogues aux modèles réels des physiciens du solide. A la condition de pouvoir manipuler, contrôler et mesurer un seul atome. Or, en même temps, des expérimentateurs



Les chercheurs de l'Institut d'optique, à Palaiseau, ont reconstitué le « M » gothique du journal « Le Monde » à partir d'atomes uniques. INSTITUT D'OPTIQUE/PALISEAU

s'étaient attelés à relever ce défi. Hans Dehmelt, qui recevra le prix Nobel en 1989, avait réussi à piéger un seul électron, pour mesurer précisément ses propriétés. En 2000, Philippe Grangier, de l'Institut d'optique, réussira la même prouesse sur un seul atome. Désormais, ses collègues savent le faire avec presque cent.

Mais comment font-ils ? Dans les années 1990, IBM avait montré comment écrire avec des atomes déplacés sur une surface à l'aide d'une pointe. Mais rien à voir avec la technique de ces simulateurs. Ici, les atomes sont dans le vide, n'interagissent qu'entre eux et sont contrôlés par divers faisceaux laser. Un nuage de quelques millions d'atomes de rubidium est d'abord amené au centre de l'enceinte expérimentale. Des faisceaux laser envoyés vers lui dans des directions opposées contrarient le mouvement des particules et les font ralentir, jusqu'à presque les figer, vers à une dizaine de millièmes de degrés au-dessus du zéro absolu. Ils bougent

à des vitesses mille fois moins rapides que les molécules d'air dans une pièce.

Puis un autre laser crée une sorte de boîte à œufs, une succession de creux et de bosses d'énergie dans laquelle les atomes tombent ; un seul par puits. Détail important, les chercheurs sont capables de dessiner n'importe quel motif (carré, rond, lettre...) grâce à un miroir diffractant ajustable. « Ce miroir agit un peu comme un voilage sur de la lumière, la diffractant en créant plusieurs points lumineux en sortie. Chaque point est un piège pour les atomes », explique Antoine Browaeys.

Déplacement des atomes

La moitié des atomes environ se répartit sans rien faire au fond des creux de la boîte. Un autre laser focalisé aux endroits désirés et agissant comme une pince optique, complète le remplissage en déplaçant un à un les atomes. En moins d'une milliseconde, chaque particule est

ainsi ajoutée, enlevée ou déplacée pour former le motif désiré.

Mais ce n'est pas tout. A ce stade, les atomes sont certes bien positionnés, mais ils ne se « voient » pas, c'est-à-dire qu'ils vivent indépendamment de leurs voisins. Une situation bien différente de la réalité ou, par exemple, l'aimantation d'un site influencera celle d'un voisin, conduisant, dans certains cas, à ce que tout ce beau monde s'aligne dans la même direction magnétique. Pour créer une force entre les atomes, les chercheurs utilisent alors un ultime faisceau laser qui fait « grossir » les atomes en forçant un des électrons de la périphérie à orbiter jusqu'à 10 000 fois plus loin du noyau. Cette déformation, réglable, écarte une charge négative du cœur électriquement positif et crée donc un dipôle. Une force modulable, 100 milliards de fois plus grande que si l'on n'avait pas excité les atomes, est ainsi créée entre deux atomes du réseau. Le système est enfin prêt.

« Plein de gens disaient que ça ne marcherait pas et, d'ailleurs, nos premières tentatives ont échoué », rappelle Antoine Browaeys. Puis, en 2009, ça a commencé à marcher, et nous avons mis plusieurs années à améliorer notre expérience, jusqu'à atteindre aujourd'hui un niveau de contrôle inégalé sur nos systèmes. »

A partir de là, une expérience typique consiste à « secouer » ce système, en ajoutant l'équivalent d'un champ magnétique ou électrique extérieur, et à observer comment il évolue. Pour l'instant, les différentes équipes, à Palaiseau, à Harvard ou à l'université du Wisconsin, essaient de valider leur simulateur dans des situations bien connues. Mais elles comptent bien rapidement « simuler » des phénomènes inconnus. Dans leur viseur, il y a le magnétisme inexplicable de pierres rares, la compréhension des matériaux récompensés par le Nobel 2016 (les isolants topologiques, conducteurs aux bords, mais isolants en leur cœur), ou l'exploration des matériaux magnétiques pour peut-être proposer des configurations permettant à terme d'alléger les aimants permanents...

La plupart de ces spécialistes ont aussi envie de se servir de ces bouliers comme des calculateurs quantiques, c'est-à-dire calculant non pas en binaire « classique », mais simultanément avec des 0 et des 1. Ces atomes ont en effet deux états internes et, mécanique quantique oblige, peuvent se trouver dans ces deux états à la fois. Rien n'empêche non plus de créer des états encore plus étranges dans ce réseau, dans lesquels les atomes seraient très fortement corrélés entre eux. Une propriété permettant des calculs en parallèle, potentiellement plus efficaces que des calculateurs classiques. Une page encore à écrire. ■

DAVID LAROUSSIERE

Prescrire moins pour soigner mieux, le nouveau défi

MÉDECINE - Née aux Etats-Unis en 2012, l'initiative « Choosing Wisely » s'étend dans une vingtaine de pays, dont la France

Ne pas demander de radiographie pour un mal de dos évoluant depuis moins de six semaines, sauf en cas de signaux d'alarme ; ne pas utiliser en routine des antibiotiques locaux sur une plaie chirurgicale ; ne pas pratiquer de frottis cervicovaginal chez les femmes de moins de 21 ans ou qui ont eu une ablation de l'utérus pour une maladie non cancéreuse... Bref, prescrire moins et à meilleur escient exams complémentaires, médicaments et autres traitements médicaux ou chirurgicaux.

Voici la philosophie du programme américain « Choosing Wisely » (« choisir avec soin »), qui comporte quelque 500 recommandations destinées aux professionnels de santé et au public. L'initiative, qui a démarré en 2012, se décline dans une vingtaine de pays dont le Canada, le Brésil, l'Australie, l'Inde, le Japon, le Royaume-Uni, l'Allemagne, et la France.

Avec cinq ans de recul, trois chercheurs de l'université du Michigan tirent un premier bilan du volet américain du mouvement dans la revue *Health Affairs* de novembre.

« Choosing Wisely a été motivé par l'idée que les professionnels de santé et les sociétés savantes devaient prendre l'initiative de définir quand des tests ou des traitements ne sont pas nécessaires ou qu'ils sont délétères », expliquent Eve Kerr et ses deux coauteurs. L'accent a été mis en grande partie sur le changement de la culture médicale, qui a longtemps épousé la croyance qu'en matière de soins, le plus est le mieux. » Une évolution de la culture médicale qui passe aussi par la sensibilisation des patients à cette lutte contre l'hypermédicalisation.

L'idée est partie d'un article paru dans le *New England Journal of Medicine*, en 2009, « pointant la nécessité d'une démarche éthique autant qu'économique pour accompagner la réforme du système de santé », résumait le docteur Francis Abramovici dans la revue *Médecine*, en avril 2016. Il s'agissait d'éviter le gaspillage sans limiter les soins nécessaires aux patients ». La part des dépenses de santé inutiles était alors estimée à 30 % aux Etats-Unis – un pourcentage comparable aux évaluations en France. Dans le contexte de la loi Obama-

care, « l'auteur proposait que toutes les spécialités médicales identifient le « top 5 » des soins superflus les plus dispendieux, en toute indépendance d'une obligation comptable ou réglementaire, et ce afin d'éviter la perte de confiance des patients vis-à-vis d'une réforme accusée de limiter certains soins », poursuivait M. Abramovici.

Reprenant ce principe du top 5, Choosing Wisely a été lancé en 2012 par l'American Board of Internal Medicine (ABIM), une fondation regroupant des médecins internistes, et Consumer Reports, une organisation non gouvernementale s'appuyant sur des consommateurs. A l'époque, aux Etats-Unis, la facture des soins non pertinents était de l'ordre de 200 milliards de dollars.

Des résultats concrets

Créé avec neuf sociétés savantes et 45 recommandations, le programme collabore désormais avec 75 sociétés savantes, qui ont édicté 500 recommandations. Celles-ci sont accessibles sur Internet (Choosingwisely.org) ou grâce à une application gratuite, avec une

version pour les professionnels de santé et une autre pour le public.

En cinq ans, Choosing Wisely s'est bien implanté aux Etats-Unis, et commence à obtenir des résultats concrets, notent les auteurs de l'article de *Health Affairs*. Par exemple, une étude a retrouvé une tendance à la baisse des examens d'imagerie pour lombalgies. Mais il reste beaucoup à faire. Ainsi, même quand les médecins sont engagés dans ce programme, il leur faut convaincre leurs patients dont beaucoup s'inquiètent d'avoir moins d'exams et de médicaments. Pour passer à la vitesse supérieure, les trois universitaires américains font une série de propositions. Ils préconisent notamment de concentrer les nouvelles recommandations sur les mauvaises pratiques les plus fréquentes, de faire davantage travailler ensemble les sociétés savantes, et d'évaluer plus rigoureusement l'impact des recommandations.

L'approche séduit aussi en France. Au CHU de Nantes, une déclinaison de Choosing Wisely, appelée « Prescrire Avec Soins », a été lancée au premier trimestre 2016,

par la direction de la communication et le pôle de santé publique. Avec des praticiens du CHU, vingt-trois messages ont été élaborés concernant les prescriptions médicalementeuses, les examens radiologiques et biologiques, la transfusion sanguine... « Trois de ces recommandations figurent en infobulles (messages d'alerte) sur le logiciel de prescription de l'hôpital, et les premiers résultats semblent positifs », indique Damien Durand, interne en santé publique qui a travaillé sur le projet. Parallèlement, onze messages sont repris dans un guide pour les internes, qui sera diffusé tout d'abord aux nouveaux arrivants, prenant leurs fonctions le 2 novembre. « Quand un interne arrive dans un service, il se plie aux habitudes de celui-ci même si elles ne sont pas pertinentes, d'où l'idée de ce livret et de ses "11 prescriptions opposables à tes chefs" avec un ton décalé », explique M. Durand.

Le mouvement devrait bientôt prendre de l'ampleur dans l'Hexagone. Le 18 mai, la Fédération hospitalière de France (FHF) a, en effet, signé une charte d'engagement avec Choosing Wisely pour

piloter ce programme dans les hôpitaux publics français. Une démarche logique pour cette fédération engagée de longue date sur le sujet de la pertinence des actes et des soins. La FHF a mené plusieurs études pour sensibiliser les pouvoirs publics et faire évoluer les pratiques. « Dans ce domaine, il y a deux approches, détaille Cédric Arcos, délégué général par intérim de la FHF. La première est institutionnelle, ce sont les règles de bonnes pratiques élaborées par des organismes comme la Haute Autorité de santé. L'inconvénient est que parvenir à des consensus prend beaucoup de temps, et l'appropriation par les professionnels reste généralement limitée. La deuxième approche, comme Choose Wisely, part du terrain. Elle amène les professionnels à faire évoluer leur pratique par eux-mêmes, ce qui est souvent mieux accepté. » Dans cette première phase, la FHF prend contact avec des sociétés savantes pour les inciter à définir des recommandations prioritaires et sensibilise les hôpitaux. ■

SANDRINE CABUT