

L'étude de la conscience : difficultés et progrès

La conscience est un domaine scientifique à part entière. Les chercheurs estiment qu'en étudiant les mécanismes neurophysiologiques et les structures cérébrales, ils comprendront comment et pourquoi on est conscient. Toutefois, il s'agit d'un domaine scientifique assez jeune qui a débuté il y a moins de 20 ans ; née de l'interaction de philosophes, psychologues et neuroscientifiques, l'étude de la conscience n'en est qu'à ses balbutiements, mais a déjà permis des progrès notables dans la caractérisation des liens entre cerveau et pensée.

Alors que parler de conscience était surtout réservé aux discussions métaphysiques, voire ésotériques, faire de celle-ci une science « sérieuse » n'a pas été facile. En effet, une approche neurobiologique de la conscience se doit de résoudre un problème difficile, celui de comprendre la relation entre états subjectifs et structures neuronales. Même s'ils adhèrent à cette approche rigoureuse, les chercheurs parlent encore de mécanismes neuronaux faisant « surgir » la conscience, d'« émergence » de la conscience ou encore du cerveau qui « crée » la conscience.

C'est un peu comme si la conscience s'apparentait à un esprit immatériel qui émergerait par magie du cerveau. Comme le remarquait le biologiste et philosophe britannique Thomas Huxley, il y a plus d'un siècle, considérer qu'un état de conscience puisse avoir lieu simplement en « excitant » des neurones est aussi dérangeant qu'accepter qu'un Djinn puisse surgir d'une lampe merveilleuse dans l'histoire d'Aladin. S'abstraire du dualisme de Descartes, où corps et esprit étaient dissociés, constitue encore l'un des défis majeurs en neurosciences cognitives.

Les neuroscientifiques ont cependant trouvé un moyen de lever cette difficulté intrinsèque à l'étude de la conscience. Sous l'impulsion de Francis Crick, codécouvreur de l'ADN, et de son étudiant Christoph Koch, une nouvelle approche dite des « corrélats neuronaux de la conscience » est apparue dans les années 1990. Celle-ci offre l'avantage de relier – ou corréler – les états subjectifs et les états mentaux, sans avoir à les fusionner ni même à établir de rapport de causalité. En conséquence, il s'agit de déterminer quelle est la différence

entre les processus neuronaux qui « corréler » et ceux qui « ne corréler pas » avec la conscience. On cherche donc les mécanismes ou événements neuronaux qui sont nécessaires et suffisants pour une expérience consciente. Pour ce faire, les scientifiques observent ce qui se passe dans le cerveau dans des situations dites conscientes, et les comparent à des situations dites non conscientes (lorsqu'il y a une perte de conscience par exemple).

Cette approche présente aussi l'avantage de s'abstraire d'une autre difficulté : l'absence de définition concrète de la conscience. En effet, nous ignorons comment et pourquoi nous sommes conscients. Cependant, nous savons « quand » la conscience est présente. Dès lors, en considérant la conscience comme une variable et en comparant des situations où elle est permise à celles, dites non conscientes, où elle disparaît, il est possible d'étudier à la fois sa spécificité fonctionnelle et ses caractéristiques neuronales. Les progrès techniques en imagerie par résonance magnétique et en électrophysiologie ont contribué à cette démarche, permettant aux scientifiques de vi-

sualiser directement le cerveau ou l'activité des neurones impliqués dans une tâche cognitive.

Aujourd'hui, ces travaux ont montré que, dans le cerveau, l'implication des régions sous-corticales et des régions corticales sensorielles (par exemple le cortex visuel) n'est pas suffisante pour qu'il y ait une expérience consciente de l'environnement. En revanche, la perception consciente mettrait surtout en jeu les régions frontales du cerveau et leurs interactions avec le cortex sensoriel, via une synchronisation des décharges neuronales (l'activité électrique de neurones est la même, en même temps). Il y a encore débat sur le fait de savoir si l'activation du cortex préfrontal est nécessaire et suffisante à l'établissement d'une expérience consciente ; mais aujourd'hui, on admet que la conscience dépend de l'activité simultanée de vastes réseaux de neurones ; elle reposerait sur une dynamique globale des connexions neuronales à longue distance dans le cerveau.

Sid Kouider,

Laboratoire de sciences cognitives et de psycholinguistique, École normale supérieure, Paris

l'intention, qui permet à différentes opérations mentales d'être regroupées en une expérience orientée vers un but.

Des fragments de conscience ?

Toutefois, lors des absences, la mémoire du présent reste intacte. Cela suggère un fractionnement de la conscience. Les crises du lobe temporal détériorent la mémoire du présent pendant longtemps, de sorte que même quand la conscience revient, elle est incomplète. Les absences perturbent la conscience en altérant la volonté d'agir, mais sans dégrader la continuité de la mémoire du présent ; la personne peut donc reprendre une conversation là où elle en était restée. En fractionnant la conscience, les absences soulignent bien la spécificité de ce qui est perdu (l'intention) et de ce qui est conservé (la mémoire du présent).

Les altérations de la conscience apparaissant lors des crises d'épilepsie peuvent

fournir des indices sur les mécanismes qui relient la conscience aux réseaux corticaux. La conscience du présent dans un contexte donné nécessite le fonctionnement de réseaux cortico-limbiques. D'ailleurs, quand un patient semble confus, les médecins et les psychologues utilisent un test clinique de compétence mentale qui évalue la conscience du présent. Le praticien teste la perception qu'a le sujet de lui-même (« Quel est votre nom ? »), du lieu (« Pouvez-vous me dire où vous vous trouvez ? ») et du temps (« Quel jour sommes-nous ? »). En effet, un délire peut obscurcir temporairement la conscience et une démence peut la désorganiser de façon permanente. À l'inverse, le contrôle volontaire de la conscience implique des circuits fronto-thalamiques, que ce soit pour les mécanismes de l'attention ou ceux de l'intention (seuls ces derniers étant altérés lors des absences).

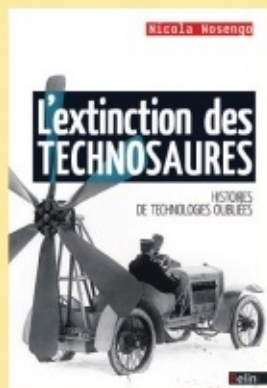
En conséquence, les réseaux cortico-limbiques et fronto-thalamiques seraient

tous deux nécessaires à la conscience. Or la plupart des gens considèrent la conscience comme une caractéristique indivisible et subjective. Cependant, l'altération de la conscience lors des absences épileptiques renforce l'hypothèse selon laquelle certains aspects de la volonté, dépendant de circuits fronto-thalamiques, peuvent être dissociés de la mémoire du présent.

D'un point de vue clinique, la compréhension des mécanismes neuronaux des crises d'épilepsies pourrait conduire à un meilleur diagnostic et à des thérapies mieux ciblées, qu'elles soient médicamenteuses ou chirurgicales. D'un point de vue scientifique, séparer les composantes neurophysiologiques de la conscience est nécessaire pour clarifier les fonctions des réseaux cérébraux à grande échelle. Et d'un point de vue philosophique, n'est-ce pas opportun de pouvoir disséquer la conscience en plusieurs composantes fonctionnelles, plutôt que d'admettre qu'elle est une caractéristique indivisible de l'esprit ? ■

La sélection **POUR LA SCIENCE**

Des livres scientifiques à la pointe de l'actualité



L'extinction des technosaures

Histoires de technologies oubliées

Nicolas Nosengo

Pourquoi le standard vidéo Betamax a-t-il été supplanté par le VHS ? Que serait devenu notre quotidien si Giovanni Caselli avait connu le succès au XIX^e siècle avec son « pantélégraphe », l'ancêtre du fax ? Ce livre conte l'histoire de toutes ces inventions mort-nées, ces « technosaures » que l'évolution n'a pas sélectionnés. Une passionnante réflexion sur le progrès technologique ...

978-2-7011-5353-7 • 256 p. • 19,50 €



L'histoire controversée du test ADN

Entre crimes, mystères et batailles légales

Alice Andreoli

Le test de l'ADN est la plus grande révolution dans l'investigation criminelle. Mais en quoi cela consiste ? Est-il vraiment infaillible ? Le présent ouvrage retrace l'histoire de la découverte et de la mise au point de ce test à travers des centaines de cas judiciaires, de grandes énigmes et légendes du passé qui ont pu enfin trouver une solution grâce à son apparition.

978-2-7011-5589-0 • 256 p. • 19,50 €



D. Jamet et F. Mottez

978-2-7011-5351-3 • 240 p. • 19,50 €



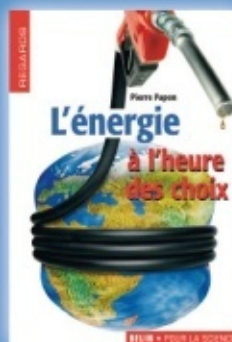
V. Tardieu

978-2-7011-4909-7 • 352 p. • 21,90 €



P. Feillet

978-2-7011-4950-9 • 192 p. • 18,50 €



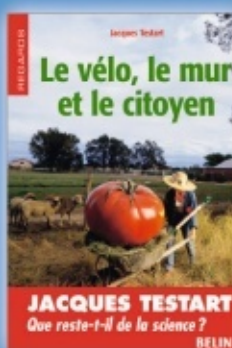
P. Papon

978-2-7011-4443-6 • 256 p. • 21,90 €



R. Rizzo

978-2-7011-4362-0 • 176 p. • 17,50 €



J. Testart

978-2-7011-4367-5 • 128 p. • 17,50 €



A. Nicolas

978-2-7011-4469-6 • 160 p. • 23,50 €



A. Nicolas

978-2-7011-3859-6 • 192 p. • 24,00 €

Feuilletez les premières pages de notre sélection de livres en exclusivité et commandez en ligne sur notre site

www.pourlascience.fr



Les gélules robots

Paolo Dario et Arianna Menciassi

Un voyage dans le corps humain n'est plus du domaine de la science-fiction. De minuscules « robots » pourraient bientôt aider au diagnostic, effectuer des interventions chirurgicales et administrer des médicaments.

En 1966, quand le film *Le voyage fantastique* est sorti sur les écrans, il n'était que pure science-fiction ; des médecins miniaturisés voyageaient dans les vaisseaux sanguins d'un patient pour réparer son cerveau. Mais 20 ans après, des ingénieurs commencent déjà à fabriquer des prototypes de la taille d'une gélule qui pouvaient se déplacer dans le tube digestif d'un patient. Et c'est en 2000 que des personnes ont avalé pour la première fois des caméras en forme de gélules. Depuis, les médecins utilisent souvent ces capsules qui prennent des images de l'intérieur du corps humain, tels les replis de l'intestin grêle, ces régions étant difficiles à voir sans intervention chirurgicale.

Aujourd'hui, ce film reste en grande partie du domaine de la science-fiction : on ne sait pas encore fabriquer des gélules caméras se déplaçant à leur guise, atteignant une tumeur pour faire une biopsie, surveillant l'inflammation dans l'intestin grêle, ou administrant des médicaments pour traiter un ulcère. Toutefois, ces dernières années, les progrès ont été considérables : les chercheurs ont transformé une gélule caméra en un véritable robot miniature. Des prototypes complexes, actuellement testés chez l'animal, sont équipés de pattes, d'hélices,

d'objectifs photographiques et de systèmes de déplacement sans fil. Bientôt, ces robots devraient être prêts pour être évalués lors d'essais cliniques. En attendant, ils permettent de tester les limites de la robotique miniaturisée.

La première gélule caméra sans fil, M2A, présentée par la Société israélienne *Given Imaging*, et les modèles ultérieurs ont établi l'intérêt d'un examen du tube digestif avec un dispositif sans fil. Les capsules vidéo-endoscopiques sont aujourd'hui utilisées en routine en médecine. Mais l'absence totale de contrôle externe engendre un nombre élevé de faux négatifs : les caméras peuvent omettre des régions de l'organisme où il y a un problème, ce qui est inacceptable pour un outil de diagnostic. Cette nouvelle façon d'observer l'intérieur de l'organisme a deux objectifs : la confirmation d'une maladie et l'exploration minutieuse d'un organe ou d'un tissu soupçonné d'être anormal ; un médecin doit donc pouvoir arrêter la caméra et la manœuvrer pour observer la région qui l'intéresse.

La transformation d'une capsule passive en un dispositif actif fiable pour un examen gastro-intestinal nécessite d'ajouter des appendices, qui guideraient la gélule dans l'organisme ou manipuleraient les tissus. Afin que l'on puisse pilo-

ter ces bras mobiles, les données doivent être transmises au chirurgien qui doit recevoir en temps réel les images et envoyer les instructions adéquates. En effet, ces capsules seraient de minuscules robots capables de réagir vite à des ordres. Tous ces composants doivent rester actifs environ 12 heures (temps de déplacement d'un objet dans le tube digestif) et ont donc besoin d'énergie. Et l'ensemble doit entrer dans une gélule de deux centimètres cubes, qu'un patient peut facilement avaler.

Contrôler et déplacer la gélule sans fil

En 2000, quand la gélule M2A faisait ses débuts, l'*Intelligent Microsystem Center* (IMC) de Séoul, en Corée du Sud, lançait un projet sur dix ans pour développer une nouvelle génération d'endoscopes en capsules. Ces gélules robots devraient disposer de capteurs et d'une source de lumière pour fournir des images. Elles auraient des outils permettant la délivrance de médicaments et la réalisation de biopsies. Et elles pourraient se déplacer, en étant contrôlées sans fil par un médecin. D'autres sociétés et groupes de recherche se sont lancés dans ce domaine. Par exemple, 18 équipes



L'ESSENTIEL

✓ Les gélules caméras permettent de voir l'intérieur du tube digestif, mais leur utilisation et leur précision restent limitées.

✓ Aujourd'hui, on développe des gélules robots actives : elles disposent de « bras », d'outils chirurgicaux, et peuvent être contrôlées sans fil. Leurs déplacements dans l'organisme sont précis.

✓ La miniaturisation de composants robotiques pour accomplir différentes tâches dans le corps humain reste un défi technique.

européennes ont formé un consortium avec l'IMC : les scientifiques mettent au point des capsules robots pour la détection et le traitement de tumeurs.

Notre équipe, à l'École supérieure Sant'Anna de Pise, en Italie, sous la direction médicale de Marc Schurr à Tübingen en Allemagne, est responsable de la coordination scientifique et technique de ce projet. Il se nomme VECTOR (*Versatile Endoscopic Capsule for gastrointestinal Tumour Recognition and therapy*), le projet visant à créer une capsule endoscopique polyvalente pour l'identification et le traitement des tumeurs gastro-intestinales.

Ces groupes universitaires et industriels ont proposé diverses solutions au problème principal, à savoir le contrôle du déplacement des gélules dans l'organisme. La plupart des solutions reposent sur une ou deux approches fondamentales. La première impose de diriger le mouvement de la capsule avec des « actionneurs » embarqués, c'est-à-dire des parties mobiles telles que des pales, des pattes ou autres dispositifs de propulsion intégrés dans la coque et capables de se déployer quand la gélule est dans le tube digestif. Les actionneurs, contrôlés par des moteurs miniatures, permettent le plus souvent de diriger la capsule, mais, dans certains cas, les bras articulés peuvent aussi écarter les tissus autour de la capsule ; l'examen ou le passage dans une section rétrécie de l'intestin sont alors facilités.

Beaucoup d'énergie

Les moteurs et les transmissions, tels les engrenages, sont grands comparés au volume d'une gélule ; l'ajout d'autres parties essentielles – le capteur pour fournir des images ou un outil de biopsie – pose problème. De plus, pour distendre un tissu, une capsule doit exercer une force importante, correspondant à 10 à 20 fois son poids. Cet effort suppose que les moteurs aient des couples élevés, et donc une puissance importante (environ un demi-watt). Cette consommation d'énergie est contraignante (pour les batteries), ce qui limite la durée de fonctionnement des robots.

Comment économiser l'énergie des batteries ? Il ne faudrait utiliser les actionneurs que pour la propulsion et trouver d'autres façons de distendre les tissus. Par exemple, l'absorption d'un demi-litre d'eau juste avant d'avaler une gélule contrôlée par une hélice distend l'estomac

Frank Hülsmeyer

pendant 20 minutes (puis le liquide s'écoule dans l'intestin grêle). Pendant ce temps, la gélule pourrait examiner la paroi de l'estomac.

Les besoins en énergie des actionneurs ont conduit certains chercheurs à développer une autre approche : l'application de champs magnétiques, créés à l'extérieur de l'organisme par des électroaimants, qui commandent sans fil le mouvement des capsules. En 2005, les sociétés *Olympus* et *Siemens* ont présenté un système de guidage magnétique de leur gélule caméra. Le dispositif engendre une rotation de la gélule ; ce mouvement en tire-bouchon produit un léger frottement qui permet à la capsule de « creuser » dans les replis du tube digestif.

Bien que l'utilisation d'électroaimants contrôlant une capsule endoscopique dans l'intestin soit simple, il est difficile de diri-

ger la gélule avec fiabilité. Les champs magnétiques perdent de la puissance avec la distance, et, avec la géométrie irrégulière de l'intestin, des modifications soudaines de l'intensité du champ magnétique peuvent faire bouger au hasard la capsule ou interrompre le contrôle magnétique. En pratique, à cause de cette instabilité, un opérateur peut perdre tout contact avec la gélule et être incapable de la retrouver. On pourrait améliorer le contrôle et la stabilité en ajoutant des électroaimants, mais au prix d'un encombrement plus important du système.

Étant donné les limites de ces deux approches, interne et externe, qui commandent les mouvements de la gélule, nous avons combiné ces méthodes et trouvé une solution indolore qui fournit des diagnostics fiables. Un contrôle magnétique externe permet de localiser

grossièrement la gélule dans l'intestin ; et des actionneurs semblables à des pattes modifient sa position et optimisent l'angle de vue de la caméra.

Des robots hybrides

Nous avons conçu une telle gélule hybride, avec quatre pattes actionnées par des moteurs, et l'avons testée chez le cochon, dont les intestins ont les mêmes dimensions que ceux de l'homme. Les pattes sont repliées lorsque la capsule est avalée et durant la plus grande partie de son voyage dans le tube digestif. Un générateur de champ magnétique externe, placé près de l'abdomen de l'animal, guide la capsule. Quand celle-ci atteint une partie de l'intestin où les parois se sont affaissées, elle soulève le tissu alentour avec les pattes pour pouvoir continuer son chemin.

DES MINIROBOTS ACTIFS DANS LE TUBE DIGESTIF

Pour fabriquer des robots miniatures fonctionnant dans le tube digestif, les ingénieurs doivent trouver les moyens de commander sans fil leur déplacement et les mouvements des outils qu'ils embarquent. Et ils doivent placer ces outils (les camé-

ras et la batterie par exemple) dans une gélule suffisamment petite pour qu'un patient puisse l'avalier. Voici quelques exemples des fonctions de ces robots minuscules et les techniques mises en œuvre.

Se déplacer

Les mouvements des robots endoscopiques peuvent être commandés soit par des actionneurs embarqués, tels des pattes, des pales, des hélices ou des appendices semblables à des cils, soit par des champs magnétiques engendrés à l'extérieur du corps du patient.



Distendre des tissus

Une façon d'écarter les tissus – pour libérer un passage ou obtenir une image – est de doter le robot de bras puissants qui peuvent exercer une poussée. Une méthode consommant moins d'énergie consiste à faire boire de l'eau au patient : le liquide distend le tube digestif et permet à une capsule propulsée par des hélices de « naviguer ».

Capsule dotée de bras



Capsule « naviguant » avec des hélices

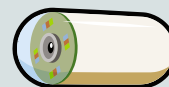


Estomac distendu



Soigner

Une capsule peut transporter différents outils : une caméra spectroscopique qui voit sous la surface d'un tissu ; une pince pour faire une biopsie du tissu ; ou un réservoir qui contient une dose de médicament.



Caméra spectroscopique



Pince pour biopsie



Réservoir de médicament

Dans la plupart des régions de l'intestin grêle et du côlon, un système de locomotion hybride suffirait aux médecins pour qu'ils puissent faire un examen visuel détaillé. Mais des situations différentes exigent des solutions différentes. Par exemple, le projet VECTOR a développé trois types de gélules destinés seulement à l'intestin grêle : une capsule caméra passive pour un examen classique ; une gélule de diagnostic, dotée d'un système de locomotion actif et d'un capteur d'imagerie spectroscopique qui détecte des anomalies de la surface du tissu ; et la troisième capsule VECTOR prévue transporterait le même capteur spectroscopique et un outil de biopsie. Ce dernier prélèverait un échantillon de tissu et le stockerait dans la capsule ; puis les médecins le récupéreraient quand la capsule sortirait de l'organisme du patient.

La capacité de faire des biopsies et d'autres gestes thérapeutiques plus complexes, telle une ablation, ferait de ces gélules robots des outils exceptionnels. Mais plusieurs difficultés restent à résoudre : la faible puissance embarquée disponible et les contraintes d'espace et de couples moteurs. Avec une unique gélule de deux centimètres cubes, il est pour l'instant impossible d'atteindre des objectifs thérapeutiques plus ambitieux, qui nécessiteraient des mouvements compliqués et de multiples actionneurs.

S'auto-assembler dans l'organisme

En conséquence, nous travaillons sur un nouveau concept : des robots chirurgicaux qui s'assemblent eux-mêmes dans l'organisme. Voyons de quoi il s'agirait. Le sujet boirait un liquide distendant l'estomac, puis avalerait jusqu'à 10 à 15 gélules. Chacune serait un composant miniaturisé, avec des électroaimants à chaque extrémité. Une fois dans l'estomac, ces capsules, guidées par le chirurgien de l'extérieur, s'assembleraient automatiquement pour former la structure souhaitée.

Un chirurgien utiliserait alors ce robot assemblé comme un outil sans fil : il pourrait opérer sans avoir besoin de faire la moindre incision externe. L'acte chirurgical terminé, les liaisons magnétiques entre les capsules seraient reconfigurées ou rompues, ce qui permettrait aux différentes parties d'être éliminées par les selles. Nous avons fabriqué un premier prototype constitué de capsules de deux centimètres cubes environ, motorisées et télécommandées. Chaque capsule pourrait porter un capteur, par exemple une caméra ou des instruments chirurgicaux spécialisés.

Les composants robotiques miniaturisés pourraient aussi avoir d'autres fonctions. Les systèmes de contrôle et les caméras mis au point pour les capsules vidéo-endoscopiques influencent déjà d'autres techniques biomédicales, tels les endoscopes classiques et les dispositifs utilisés pour les laparoscopies (l'examen de l'intérieur de l'abdomen). Au-delà des soins médicaux, on constate une tendance à la miniaturisation et à la commande sans fil de robots multifonctionnels. Les gélules robots serviront sans doute d'exemples pour d'autres machines utilisées dans de tout autres domaines. ■



UNE GÉLULE HYBRIDE GUIDÉE par des électroaimants externes se déplace dans le côlon d'un cochon, en utilisant ses pattes pour ajuster sa position et repousser le tissu environnant.

Arianna Mencias

Opérer à distance

On peut étendre la gamme des tâches que peuvent effectuer les gélules robots en les concevant de sorte qu'elles s'auto-assemblent dans l'organisme. Le patient avalerait une douzaine de gélules ; dans l'estomac, ces gélules s'assembleraient pour former un robot. Les chirurgiens contrôlèrent ce dispositif à distance, sans fil. Lorsque l'acte chirurgical serait terminé, le robot se scinderait en capsules, qui passeraient sans difficulté dans le tube digestif.

Une configuration chirurgicale possible



Frank Hülshömer

LES AUTEURS



Paolo DARIO et Arianna MENCIASSI sont professeurs de robotique biomédicale à l'École supérieure Sant'Anna de Pise, en Italie.

✓ BIBLIOGRAPHIE

K. Harada *et al.*, *Wireless reconfigurable modules for robotic endoluminal surgery*, *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Kobe, Japon, 2009.

P. Valdastris *et al.*, *Wireless therapeutic endoscopic capsule : in vivo experiment*, *Endoscopy* 2008, vol. 40, pp. 979-982, 2008.

A. Moglia *et al.*, *Wireless capsule endoscopy : from diagnostic devices to multipurpose robotic systems*, *Biomedical Microdevices*, vol. 9, pp. 235-243, 2006.

Un démon de Maxwell pour REFROIDIR LES ATOMES

Mark Raizen

Une expérience de pensée du XIX^e siècle inspire
une technique permettant de manipuler des atomes
afin de les ralentir et d'abaisser leur température
à des valeurs proches du zéro absolu.

L'ESSENTIEL

✓ Les méthodes usuelles pour refroidir les gaz à une température proche du zéro absolu ne fonctionnent que pour certains éléments.

✓ En combinant deux nouvelles techniques, on peut refroidir des atomes de presque tous les éléments, voire certaines molécules.

✓ Un canon magnétique « inversé » ralentit d'abord les atomes. On poursuit le refroidissement par une technique inspirée du « démon de Maxwell », imaginé vers 1870.

✓ Les applications vont de l'étude des propriétés des particules élémentaires à la séparation d'isotopes.

Pendant que vous lisez ces lignes, des molécules filent autour de vous à 3000 kilomètres par heure, vous bombardant de tous côtés, tandis que les atomes et molécules dont vous êtes constitué virevoltent, vibrent et entrent sans cesse en collision. Dans la nature, rien n'est parfaitement immobile: tout bouge en permanence. Et plus les atomes et les molécules vont vite, plus ils portent de l'énergie. Cette énergie collective et désordonnée, nous la ressentons à notre échelle sous forme de chaleur.

Le repos total, correspondant à la température du zéro absolu (zéro kelvin, soit $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$), est physiquement impossible. Pourtant, les scientifiques s'approchent de plus en plus de cette limite. Dans ces conditions extrêmes, d'étranges effets quantiques se manifestent. En parvenant à refroidir un gaz d'atomes jusqu'à une petite fraction seulement au-dessus du zéro absolu, les physiciens ont pu observer la matière se comporter comme une onde et concevoir des appareils de mesure de plus en plus précis.

Les techniques de refroidissement les plus répandues ne sont applicables qu'à

un nombre restreint d'éléments du tableau périodique de Mendeleïev, ce qui limite leur utilisation. Ainsi, refroidir l'hydrogène, le plus simple de tous les atomes, a longtemps donné du fil à retordre aux physiciens. La nouvelle méthode de refroidissement que mon équipe a mise au point parvient désormais à refroidir très efficacement la plupart des éléments, tout comme de nombreuses molécules.

Pour relever ce défi technique, je me suis inspiré du physicien écossais du XIX^e siècle, James Clerk Maxwell, auteur d'une expérience de pensée dans laquelle il a théorisé l'existence d'un « démon » violant les lois de la thermodynamique...

Ce démon constitue la base d'une technique inédite de cryogénie. De nouvelles voies de recherche s'ouvrent et conduisent à de nombreuses applications. On pourrait purifier des isotopes rares, utiles en médecine comme en recherche fondamentale. Ce « superfroid » contribuerait à l'amélioration des méthodes de fabrication des puces électroniques à l'échelle nanométrique, et à la conception d'horloges atomiques encore plus précises. Côté recherche, le refroidissement extrême