

Cette découverte constituerait un indice fantastique pour accéder à la physique quantique des trous noirs. Si, au contraire, ces fluctuations ne sont pas présentes, nous serons aiguillés vers le scénario quantique faible, plus subtil, ou vers quelque chose d'encore plus exotique.

Le scénario «non violent faible» est plus difficile à tester en raison de la petitesse des changements géométriques attendus. Mais des études préliminaires montrent que ce scénario modifierait la façon dont les ondes gravitationnelles sont absorbées ou réfléchies, ce qui produirait peut-être une modification observable des signaux d'ondes gravitationnelles.

Si l'un de ces scénarios est correct, nous en apprendrons davantage non seulement sur ce que sont les trous noirs, mais également sur la nature profonde du monde. Pour l'instant, nous ne savons pas clairement comment caractériser la localisation de l'information en présence de champs gravitationnels. Les avancées récentes en physique quantique suggèrent que l'espace-temps lui-même n'est peut-être pas une composante fondamentale du monde, mais émergerait d'une structure mathématique plus profonde. Des signes de trous noirs quantiques pourraient nous aider à concrétiser cette idée.

Pour en apprendre davantage, il est important d'améliorer à la fois les observations de l'EHT et les mesures d'ondes gravitationnelles. Pour l'EHT, il serait utile de réaliser des observations de durée nettement plus longues, ainsi que des images d'autres cibles, telles que le trou noir au centre de la Voie lactée, deux idées qui sont déjà au programme. Pour les ondes gravitationnelles, de nouveaux interféromètres, au Japon et en Inde, s'ajouteront aux installations existantes en Europe et aux États-Unis, dont on améliore constamment la sensibilité. Parallèlement, les théoriciens travaillent pour affiner leurs modèles, étayer leurs explications et évaluer comment ces scénarios affectent les signaux de l'EHT et des détecteurs d'ondes gravitationnelles.

Quelle que soit la solution du paradoxe de l'information, les trous noirs renferment des indices cruciaux pour tendre vers une théorie quantique de la gravitation et déterminer la nature même de l'espace et du temps. Comme avec les atomes et la mécanique quantique au début du xx^e siècle, une meilleure compréhension des trous noirs a toutes les chances de montrer la voie de la prochaine révolution conceptuelle de la physique. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. B. Giddings, **Black holes in the quantum Universe**, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 377, 20190029, 2019.

D. Harlow, **Jerusalem lectures on black holes and quantum information**, *Reviews of Modern Physics*, vol. 88, 015002, 2016.

J. Polchinski, **L'horizon des trous noirs brûle-t-il ?**, *Pour la Science*, n° 456, octobre 2015.

S. W. Hawking, **Particle creation by black holes**, *Communications in Mathematical Physics*, vol. 43(3), pp. 199-220, 1975.

**changement climatique :
quel impact sur
la diffusion des maladies
infectieuses ?**

table ronde
accès gratuit sur réservation obligatoire

— jeudi 3 décembre à 18h30

cité
sciences
et industrie

AVEC LE SOUTIEN DE **SCIENCES AVENIR** La Recherche **SCIENCE**

Déséquilibre des écosystèmes,
multiplication de moustiques vecteurs
de dengue, chikungunya, zika...

Quel est le rôle du changement climatique
dans l'apparition des maladies infectieuses
et la propagation des épidémies ?
Comment l'Europe et l'Afrique de l'Ouest
s'organisent pour mieux les anticiper ?

Séance co-organisée avec l'Institut
de recherche et développement (IRD)
et l'Institut national de la santé
et de la recherche médicale (Inserm),
à Paris et en duplex avec les équipes locales
de l'IRD en Côte d'Ivoire.



Informations sur cite-sciences.fr

Les molécules du toucher se dévoilent

Comment les cellules détectent-elles le contact et la pression mécanique pour ensuite transmettre la perception tactile vers le cerveau ? Après des décennies d'interrogations, les chercheurs ont découvert quelques-unes des protéines à la clé de ce processus.

La jeune fille s'efforçait de garder bras et mains immobiles, mais ses doigts se tortillaient en tous sens. Si elle fermait les yeux, c'était encore pire. Ce n'est pas qu'elle manquait de force pour les maîtriser, non : elle n'avait pas vraiment de contrôle fin sur ses membres.

Carsten Bönnemann se souvient d'avoir examiné cette adolescente dans un hôpital de Calgary, au Canada, en 2013. En tant que pédiatre neurologue à l'Institut national américain des troubles neurologiques et des accidents vasculaires cérébraux, à Bethesda, dans le Maryland, il voyageait souvent pour s'occuper de cas déroutants. Mais cette fois, il dut reconnaître qu'il n'avait jamais rien vu de tel.

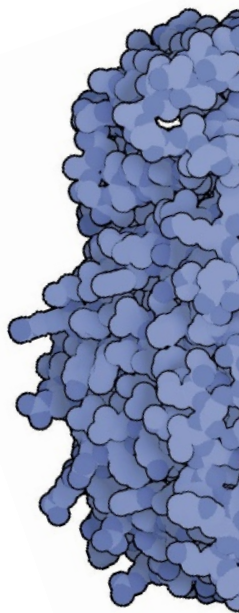
Si la jeune fille ne regardait pas ses membres, elle semblait dépourvue de toute indication sur leur position. Il lui manquait le sens de la disposition de son corps dans l'espace, une aptitude cruciale nommée «proprioception». «C'est quelque chose qui lui est totalement étranger», précise Carsten Bönnemann.

En 2016, son équipe a séquencé le génome de l'adolescente et celui d'une autre jeune fille présentant des symptômes similaires, et a identifié des mutations dans un gène noté *Piezo2*.

Par une heureuse coïncidence, quelques années plus tôt, en 2010, l'équipe d'Ardem Patapoutian, de l'institut de recherche Scripps, à La Jolla, avait identifié la fonction de ce gène. Alors qu'ils cherchaient à déterminer par quels mécanismes les cellules sentent le toucher, ces chercheurs avaient démontré que le gène en question codait une protéine sensible à la pression physique.

LES PROTÉINES PIEZO, DES CANAUX IONIQUES MÉCANOSENSIBLES

La découverte de cette protéine, Piezo2, et d'une autre apparentée, Piezo1, a été l'apogée de plusieurs décennies de recherche sur les mécanismes qui contrôlent le sens du toucher. Les Piezo sont des canaux ioniques – c'est-à-dire des pores dans la membrane cellulaire qui permettent le passage des ions – sensibles à une tension mécanique. «Nous avons beaucoup appris sur la façon dont les cellules communiquent, et c'est presque toujours par signalisation chimique, explique Ardem Patapoutian. Ce dont on est en train de s'apercevoir aujourd'hui, c'est que la sensation mécanique d'une force physique est aussi un mécanisme de signalisation. Et pour l'heure, on en sait très peu à ce sujet.»



L'ESSENTIEL

> Le sens du toucher repose sur des canaux ioniques sensibles aux forces mécaniques et présents dans la membrane des cellules, que l'on commence tout juste à identifier.

> Ces molécules sont impliquées dans les sens du toucher, de l'équilibre,

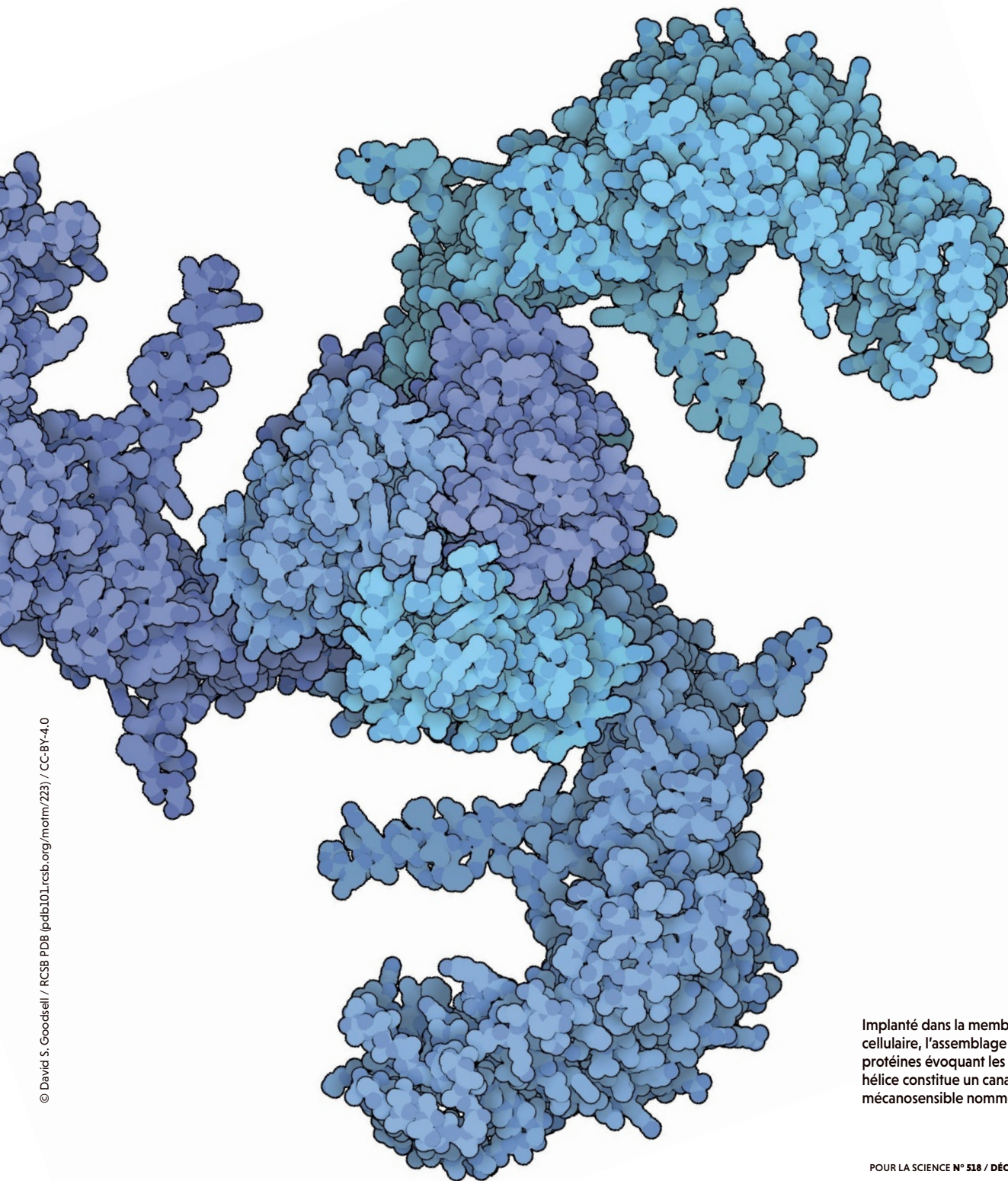
de l'ouïe... Elles jouent aussi un rôle dans la formation des os ou la perception de la circulation sanguine par les cellules.

> Des anomalies de ces mécanorécepteurs sont à l'origine de diverses maladies, telles que certaines douleurs chroniques.

L'AUTRICE



AMBER DANCE
journaliste scientifique
indépendante basée
à Los Angeles, en Californie



Implanté dans la membrane cellulaire, l'assemblage de trois protéines évoquant les pales d'une hélice constitue un canal ionique mécanosensible nommé Piezo1.

> Le toucher contribue au fonctionnement de presque tous les types de tissus et de cellules, précise Ardem Patapoutian. Les organismes interprètent les forces pour comprendre leur monde, que ce soit pour apprécier une caresse ou éviter un stimulus douloureux. Dans le corps, les cellules perçoivent le sang circuler, l'air gonfler les poumons, l'estomac ou la vessie se remplir. De même, l'audition fait intervenir des cellules de l'oreille interne qui détectent la pression des ondes sonores.

DES STRUCTURES ÉTUDIÉES PAR CRYOMICROSCOPIE ÉLECTRONIQUE

Au cours de la dernière décennie, les études sur les canaux Piezo et d'autres canaux ioniques mécanosensibles se sont multipliées. Plus de 300 articles scientifiques ont été publiés sur les seuls Piezo depuis trois ans. L'une des questions soulevées est de savoir comment ces protéines, situées dans la membrane cellulaire, détectent les forces et y réagissent. Grâce à la cryomicroscopie électronique [qui consiste à congeler à très basse température des tissus biologiques pour pouvoir les observer avec un microscope électronique de fort grossissement, ndlr], les scientifiques ont progressé dans l'élucidation de la structure – quelque peu intrigante – de ces canaux Piezo, qui apparaissent ainsi formés de trois pales, comme une hélice; mais à ce jour, on ignore encore le mécanisme d'action précis de ces pores.

Les chercheurs découvrent également que les Piezo participent à d'autres fonctions que le toucher et la proprioception. Par exemple, ils aideraient à expliquer pourquoi certaines personnes sont résistantes au paludisme, et peut-être même pourquoi les cosmonautes perdent de la densité osseuse en orbite. Et, déjà, les scientifiques cherchent à cibler ces protéines sensibles aux forces avec des médicaments, pour traiter, par exemple, la douleur chronique. «On savait depuis longtemps que les cellules faisaient cela [à savoir détecter les forces et les pressions, ndlr], mais nous n'avions aucune idée de la façon dont elles s'y prenaient», précise Miriam Goodman, physiologiste sensorielle à l'université Stanford, en Californie. «Les Piezo ont vraiment tout changé.»

Le toucher a longtemps été un sens complexe... D'autres aptitudes sensorielles, comme la vue et le goût, sont beaucoup mieux comprises, explique Ardem Patapoutian: les photons qui atteignent l'œil ou les molécules qui s'infiltrant dans le nez et sur la langue activent tous des récepteurs de la même famille. Ces derniers déclenchent alors l'ouverture de canaux ioniques dans les membranes cellulaires et permettent ainsi à des ions positifs d'entrer dans les cellules. Ce qui les dépolarise, et le stimulus est ainsi converti

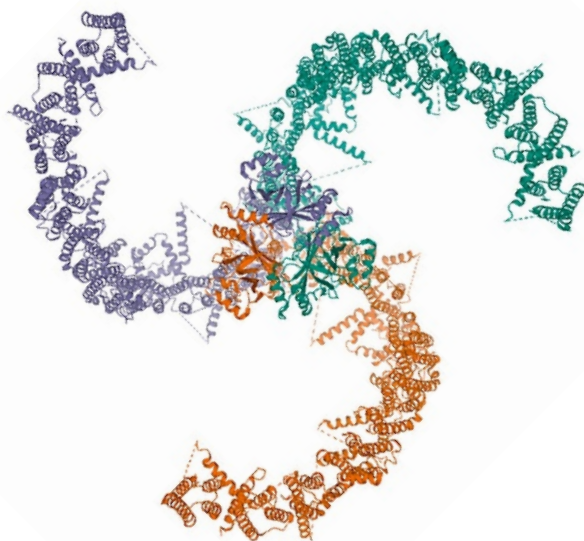
en un signal électrique que le cerveau décode et interprète.

Les scientifiques soupçonnaient que pour le toucher, la proprioception et l'audition, il devait exister une protéine agissant à la fois comme capteur de force et comme canal ionique, car pour l'ouïe par exemple la signalisation [la conversion du stimulus en signal électrique, ndlr] se fait rapidement, en quelques microsecondes. Mais l'identité de ces protéines à la fois canaux et capteurs est longtemps restée mystérieuse, du moins chez les mammifères. En effet, les chercheurs avaient seulement trouvé quelques canaux mécanosensibles chez les bactéries, les drosophiles (ou mouches à vinaigre) et les vers nématodes.



On cherche déjà à cibler ces protéines pour traiter la douleur chronique

Ardem Patapoutian et son collègue Bertrand Coste ont alors élaboré un plan. Ils allaient mener leur recherche sur un type de cellules de souris dont ils savaient qu'elles étaient capables de transformer un très léger contact de la pointe d'une pipette en un courant électrique détectable. Bertrand Coste allait inactiver les uns après les autres les gènes dont il suspectait qu'ils pouvaient coder des canaux ioniques, un à un dans chaque lot de cellules, afin de rechercher le lot qui aurait soudainement perdu sa sensibilité au toucher. Confiant, il commença ainsi ses expériences,



pensant qu'il lui faudrait quelques mois, au mieux des semaines, pour obtenir un résultat.

En réalité, cela lui a pris une bonne partie de l'année. Peu avant la fin de 2009, il observa quelque chose – ou plutôt, il ne vit plus rien : alors qu'il piquait un lot de cellules avec sa pipette, elles ne réagirent pas. Le chercheur pensa qu'il avait dû éliminer un canal sensible aux forces. «C'était une très belle journée», se souvient Bertrand Coste, aujourd'hui chercheur du CNRS à Marseille. Avec Ardem Patapoutian, il nomma alors le gène de souris correspondant *Piezo1*, du mot grec signifiant «pression», et a rapidement identifié le *Piezo2*. Plus tard, en 2014, l'équipe a ensuite directement relié le *Piezo2* à la sensation de toucher dans les neurones sensoriels et les cellules de peau des souris.

Les chercheurs étaient alors très enthousiastes, se souvient Miriam Goodman, notamment parce que les protéines Piezo codées par ces gènes étaient très grosses et très complexes. Composée de plus de 2500 acides aminés et pesant 300 kilodaltons, la structure de *Piezo1* traverse la membrane cellulaire 38 fois : un record ! En comparaison, les protéines des mammifères contiennent en général jusqu'à 500 acides aminés.

DE TRÈS GROSSES PROTÉINES

Malheureusement, cette taille gigantesque a empêché les chercheurs de répondre à des questions essentielles : comment ces canaux ioniques perçoivent-ils les forces et pressions ? Comment s'ouvrent-ils et se ferment-ils ? La structure d'une protéine aide beaucoup à répondre à ce genre de questions, explique le biophysicien Roderick MacKinnon, de l'université Rockefeller, à New York. «Nous ne savons rien tant que nous ne l'avons pas vraiment visualisée.»

En effet, les techniques d'analyse de la structure des molécules, telles que la cristallographie aux rayons X et la spectroscopie de

résonance magnétique nucléaire, ne sont pas bien adaptées aux protéines complexes et de grande taille, explique le neuroscientifique Bailong Xiao, de l'université Tsinghua, à Pékin, ancien postdoctorant au laboratoire d'Ardem Patapoutian. Heureusement, à ce moment-là, quand Bailong Xiao installait son laboratoire en 2013, une autre méthode permettant d'obtenir des structures en haute résolution se développait : la cryomicroscopie électronique.

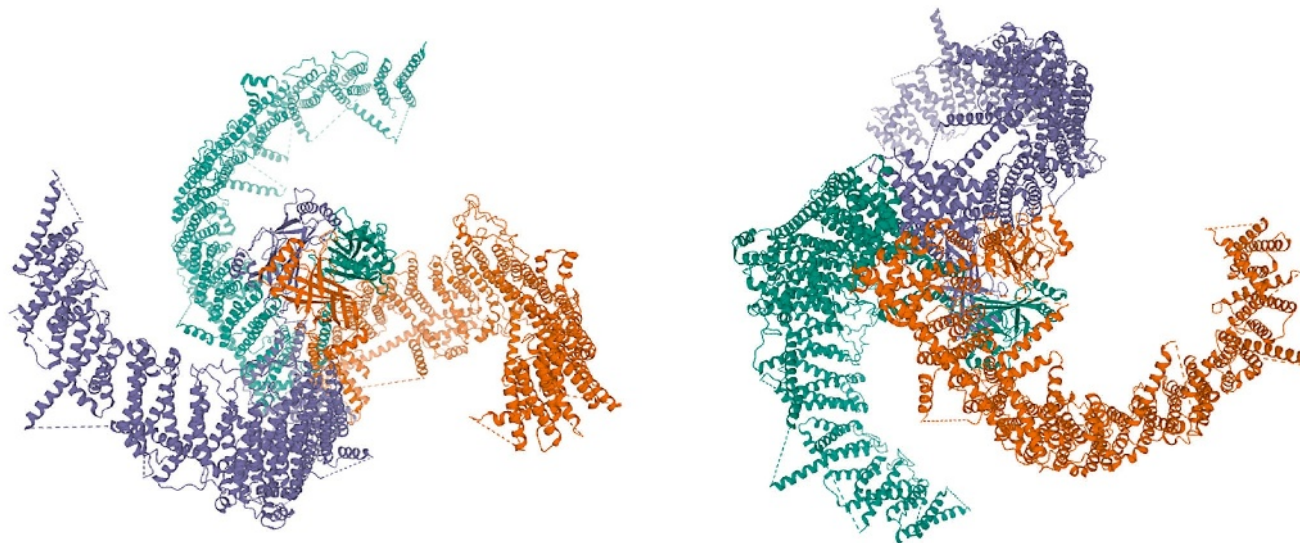
Son équipe a donc utilisé cette technique pour proposer, en 2015, les premières images de la structure tridimensionnelle de *Piezo1*. Depuis, les groupes de Bailong Xiao, Roderick MacKinnon et Ardem Patapoutian ont présenté d'autres versions en plus haute résolution de la protéine.

COMME LES TROIS PALES D'UNE HÉLICE

En septembre 2019, Bailong Xiao a poursuivi ses analyses avec une image de *Piezo2*, similaire à celle de *Piezo1* par sa taille et par sa forme. À ce jour, cette image donne la vue la plus nette des extrémités des trois pales du complexe protéique, qui bougent et sont donc difficiles à visualiser. Les images sont saisissantes. Trois protéines Piezo s'associent en un complexe trimère qui traverse la membrane plasmique de la cellule (*voir l'encadré page 38*). À partir du pore central, trois bras s'échappent ainsi en spirale, comme les pales d'une hélice. Ils s'incurvent vers le haut et l'extérieur, créant un profond sillon à la surface de la cellule.

Ardem Patapoutian et Bailong Xiao pensent que lorsqu'une force s'exerce sur la membrane, les pales déplacent des poutrelles protéiques à l'intérieur du canal, ce qui, d'une certaine façon, ouvre le pore. Pour Roderick MacKinnon, la façon inhabituelle dont les pales des Piezo plissent la membrane suggère un mécanisme distinct : si une poussée ou une traction augmente la tension de la membrane, le canal incurvé s'aplatirait, ce qui ouvrirait le pore. ➤

Trois vues, sous des angles différents, de la structure tridimensionnelle du canal ionique *Piezo2*, un autre canal ionique mécanosensible.



> Ces hypothèses ne peuvent pas encore être vérifiées, car les chercheurs n'ont pour l'instant pu étudier que des protéines Piezo isolées, extraites de leur membrane et ayant donc une conformation fermée. Enregistrer une image d'un Piezo intégré à une membrane cellulaire et en conformation ouverte devrait aider les scientifiques à en comprendre ses secrets. « Nous voulons le voir

dans son environnement naturel », explique Ardem Patapoutian.

Plusieurs équipes essaient donc d'obtenir l'image d'un Piezo ouvert. Le groupe d'Ardem Patapoutian utilise un composé qui active le Piezo1 et qu'il a nommé Yoda1, d'après le surnom du maître Jedi dans la saga *Star Wars*. Patapoutian espère qu'avec la présence de Yoda1, Piezo1 pourrait s'ouvrir le temps d'une

CAPTEURS CELLULAIRES DE FORCES MÉCANIQUES

Les cellules présentent dans leur membrane des protéines spécialisées qui leur permettent de détecter les forces et les pressions. Les protéines Piezo sont parmi les mieux caractérisées chez les mammifères : elles forment des canaux qui transportent les ions de part et d'autre de la membrane cellulaire. Les chercheurs tentent de déterminer comment ces canaux s'ouvrent et se ferment.

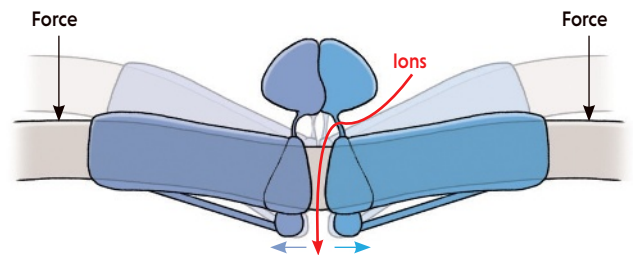
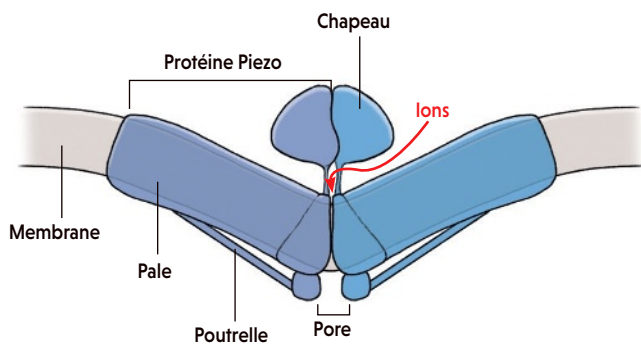
CANAL IONIQUE FERMÉ

Les images de canaux fermés révèlent qu'ils sont construits à partir de trois protéines Piezo, chacune apportant une pale et une poutrelle disposées autour d'un pore central. Le canal plisse la membrane dans laquelle il se trouve, formant ainsi une petite butte.

CANAL IONIQUE OUVERT

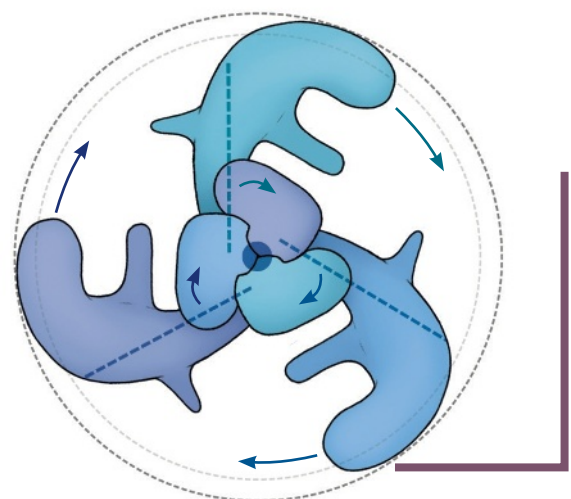
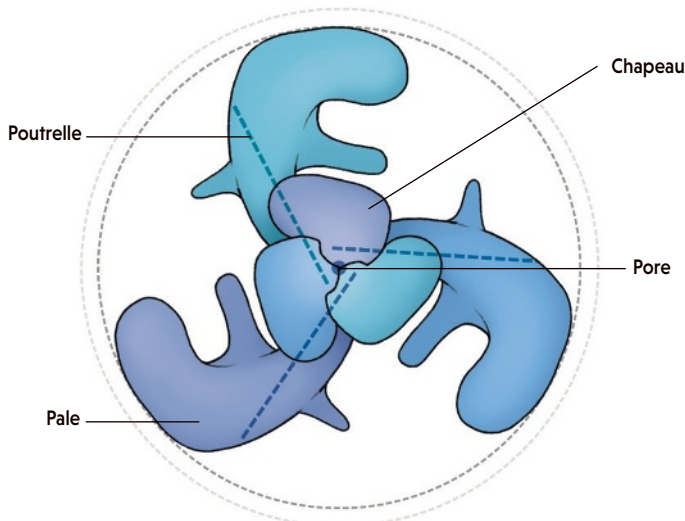
Il n'existe pas d'images de canaux Piezo ouverts, mais les chercheurs ont quelques hypothèses sur la façon dont ils pourraient s'ouvrir. Les pales incurvées s'aplatiraient pour ouvrir le pore, ou une force déplacerait les pales, agissant d'une manière ou d'une autre sur les poutrelles pour ouvrir le canal.

VUE DE PROFIL



La rotation des pales aurait pour conséquence l'ouverture du canal. Certaines études suggèrent que chaque pale peut bouger indépendamment.

VUE DU DESSUS



«photographie». Il s'intéresse également à l'insertion des protéines Piezo dans des membranes artificielles appelées «nanodisques», ce qui permettrait de stabiliser la conformation ouverte. Bailong Xiao, lui, utilise toujours la cryomicroscopie électronique pour visualiser l'échantillon sous différents angles d'inclinaison, ce qui permettrait de clarifier la structure des Piezo, que ce soit dans des membranes naturelles ou artificielles.

DES FONCTIONS DIVERSES DANS L'ORGANISME

Parallèlement à ces études structurales, les scientifiques découvrent que les protéines Piezo jouent des rôles variés dans l'organisme. En 2014, le neuroscientifique Alex Chesler a rejoint le Centre américain pour la santé intégrative et complémentaire, à Bethesda. Inspiré par la découverte de Bertrand Coste, il créa alors des souris dépourvues de protéines Piezo2 pour étudier leur rôle dans le toucher. Puis, un jour, il reçut un courriel de Carsten Bönemann, qui travaillait dans le même bâtiment que lui, à propos des jeunes filles qui ont perdu le sens de la proprioception.

Alex Chesler monta directement au bureau de Carsten Bönemann. Haletant, il annonça : «Vous n'avez pas idée de ce que vous avez sous les yeux!» Alex Chesler ne pouvait évidemment pas demander à ses souris dépourvues de Piezo2 ce qu'elles ressentaient, ou plutôt ne ressentaient pas, mais il pouvait interroger les gens...

Carsten Bönemann et lui invitèrent alors les jeunes filles à venir à Bethesda pour que leur état soit évalué plus en détail. Les deux adolescentes compensaient remarquablement bien leur handicap, en utilisant la vue pour réussir à marcher sur une ligne représentée au sol ou pour toucher une cible du doigt. Mais les yeux bandés, elles étaient complètement perdues. De même, elles sentaient les vibrations d'un diapason contre leur peau, car elles pouvaient l'entendre. Alors qu'en portant des casques antibruit, elles ne les remarquaient pas du tout.

COORDINATION DES MOUVEMENTS, DOULEURS CHRONIQUES...

Ardem Patapoutian a observé le même phénomène chez des souris : sans protéine Piezo2 dans les nerfs qui innervent les muscles et les tendons, les rongeurs souffrent d'un trouble de la proprioception et n'arrivent pas à coordonner leurs mouvements. Son équipe a également montré que les Piezo2 interviennent dans les neurones sensibles à la douleur, notamment dans les cas d'allodynie, un type de sensations douloureuses dans lesquelles même une légère caresse donne l'impression que l'on est piqué par des aiguilles. Certaines personnes atteintes



En revenant d'une mission sur la *Station spatiale internationale*, le cosmonaute russe Sergey Ryazanskiy a des difficultés à se tenir debout après son séjour en apesanteur. Il a probablement perdu de la densité osseuse en raison d'une sous-stimulation des canaux Piezo.

de douleurs neuropathiques souffrent d'une telle hypersensibilité en permanence.

Les souris aussi présentent une forme d'allodynie lorsqu'on leur injecte de la capsaïcine, la molécule des piments forts, ou après une lésion nerveuse... sauf s'il leur manque le gène *Piezo2*! D'ailleurs, en 2018, Alex Chesler et Carsten Bönemann ont également constaté des changements similaires dans la perception de la douleur chez les personnes présentant des mutations de *Piezo2*.

«La douleur chronique a un effet très néfaste et insupportable», explique Swetha Murthy, qui a dirigé l'une des études sur l'allodynie quand elle était postdoctorante dans l'équipe d'Ardem Patapoutian. «Je pense que nous pouvons commencer à identifier des cibles médicamenteuses pour le *Piezo2* dans ces cas de neuropathies.» Ainsi, Ardem Patapoutian et Alex Chesler sont tous deux à la recherche de molécules qui bloqueraient l'activité des Piezo2 au niveau d'un site douloureux, sans interférer avec les autres rôles des protéines dans l'organisme. «Il existe un énorme potentiel pour la découverte de médicaments qui cibleraient les canaux Piezo», déclare Bailong Xiao.

DES AFRICAINS RÉSISTANTS AU PALUDISME

Il n'y a pas que les neurones qui ont besoin de ressentir le toucher et la pression ; presque toutes les cellules sont soumises à des forces. Prenez les globules rouges (ou hématies) par exemple, qui se déforment pour se déplacer dans de minuscules capillaires sanguins. Les mutations provoquant une hyperactivation de Piezo1 engendrent un «ratatinage» de ces cellules sanguines, ce qui est à l'origine d'une anémie chez les personnes atteintes d'une maladie rare appelée «stomatocytose héréditaire avec hématies déshydratées» (DHS).

Article initialement publié sous le titre «*Feel the force*» dans la revue *Nature* (vol. 577, pp. 158-160, 9 janvier 2020), <https://www.nature.com/articles/d41586-019-03955-w>

© Nature Publishing Group

> Ces cellules sanguines «ratatinées» rappellent à Ardem Patapoutian celles que l'on retrouve dans la drépanocytose. En effet, la mutation du gène de la drépanocytose a persisté chez de nombreuses personnes d'origine africaine, car elle protège contre le paludisme. Dès lors, le chercheur se demande si des mutations de *Piezo1* feraient de même... Si tel est le cas, le taux de ces mutations devrait être relativement élevé chez les individus d'origine africaine.

En 2018, des analyses de grandes bases de données ont validé cette hypothèse: en fait, un variant particulier de *Piezo1* existe chez un tiers des personnes ayant une ascendance africaine. Et en 2019, l'équipe d'Elizabeth Egan, de l'université Stanford, a confirmé que les individus portant cette mutation de *Piezo1* résistent mieux au paludisme.

DES OS SOLIDES

Selon l'équipe de Bailong Xiao, les protéines *Piezo1* participent également à la formation et à l'entretien des os. Lorsque son équipe a «éteint» le gène *Piezo1* dans des ostéoblastes de souris – les cellules qui fabriquent les os –, les rongeurs ont grandi en étant plus petits et plus maigres que la normale. Les os longs supportant le poids de leur corps étaient plus légers, plus minces et plus fragiles que ceux des souris témoins.

De plus, en 2019, les chercheurs de l'équipe de Bailong Xiao ont montré que des rongeurs normaux partiellement suspendus en l'air, et qui n'ont donc pas à supporter leur poids en permanence, présentent des niveaux d'expression du gène *Piezo1* et des niveaux de masse osseuse plus faibles que les souris restées libres de leurs mouvements. Un phénomène qui ressemble beaucoup à ce qui arrive aux personnes atteintes d'ostéoporose, ou qui sont longtemps alitées, ainsi qu'aux cosmonautes à bord de la *Station spatiale internationale*, précise Bailong Xiao.

DES CANAUX MÉCANO-SENSIBLES POUR ENTENDRE

«La découverte des canaux *Piezo* représente un énorme pas en avant, affirme Kate Poole, biologiste à l'université de Nouvelle-Galles du Sud à Sydney, en Australie, mais il est également clair que l'histoire ne se limite pas aux *Piezo*.» En fait, les scientifiques qui s'intéressent à l'audition recherchent le canal approprié depuis quatre décennies. «Il y a eu beaucoup de fausses pistes dans cette histoire», précise Jeffrey Holt, neuroscientifique à l'hôpital pour enfants de Boston, dans le Massachusetts. «Mais maintenant, nous pensons que nous avons une assez bonne idée de la situation.»

En effet, la protéine canal qui joue un rôle clé dans l'audition se nomme TMC1. En 2018, lorsque Jeffrey Holt et ses collègues ont modifié la séquence d'acides aminés qui composent

cette protéine, ils ont aussi changé la capacité des cellules de l'oreille interne à traduire les signaux mécaniques [la pression des ondes sonores, ndlr] en signaux électriques. Et en 2019, une autre équipe a montré que la protéine TMC1 purifiée est capable de créer un canal ionique mécanosensible dans des bulles

On recherche d'autres familles de canaux mécanosensibles

de membranes artificielles. Toutefois, la structure de TMC1 reste un mystère, car il est difficile de purifier la protéine en quantité suffisante pour obtenir de bonnes images en cryomicroscopie électronique.

Quant à l'équipe d'Ardem Patapoutian, elle est aujourd'hui à la recherche de nouvelles familles de canaux mécanosensibles. En 2018, Ardem Patapoutian, Swetha Murthy et le biologiste Andrew Ward, de l'institut de recherche Scripps, ont présenté ce qu'ils pensent être le plus grand groupe de canaux activés mécaniquement. Ils connaissaient déjà une famille de protéines qui permettent aux plantes de ressentir la pression osmotique: les protéines OSCA. Et ils pensaient qu'elles pourraient être sensibles à davantage de forces. Et en effet, dans des cellules rénales humaines, les OSCA ont aussi réagi à l'étirement des membranes cellulaires.

Les chercheurs savaient également, grâce à des études antérieures, que les protéines OSCA sont étroitement liées à une autre famille de protéines chez les mammifères, les TMEM63. Les canaux TMEM63 des souris, des humains et même des drosophiles ont aussi réagi à l'étirement dans les expériences de Swetha Murthy. Ainsi, les protéines OSCA et TMEM63 constituent une grande famille de canaux mécanosensibles, commune à de nombreuses espèces vivantes.

Les canaux découverts jusqu'à présent ne peuvent pas, à eux seuls, expliquer tous les cas de mécanosensibilité cellulaire, explique Swetha Murthy, aujourd'hui biophysicienne et neuroscientifique à l'université de santé et de sciences de Portland, dans l'Oregon. Il s'agit désormais de trouver d'autres mécanorécepteurs. Et ces derniers assurent probablement plus de fonctions que celles connues aujourd'hui, affirme Ardem Patapoutian: «Nous avons à peine effleuré la surface.» ■

BIBLIOGRAPHIE

L. Wang et al., **Structure and mechanogating of the mammalian tactile channel *Piezo2***, *Nature*, vol. 573, pp. 225-229, 2019.

W. Sun et al., **The mechanosensitive *Piezo1* channel is required for bone formation**, *eLife*, vol. 8, e47454, 2019.

S. E. Murthy et al., **OSCA/TMEM63 are an evolutionarily conserved family of mechanically activated ion channels**, *eLife*, vol. 7, e41844, 2018.

A. T. Chesler et al., **The role of *Piezo2* in human mechanosensation**, *N. Engl. J. Med.*, vol. 375, pp. 1355-1364, 2016.

J. Ge et al., **Architecture of the mammalian mechanosensitive *Piezo1* channel**, *Nature*, vol. 527, pp. 64-69, 2015.

M. Szczot et al., ***Piezo2* mediates injury-induced tactile pain in mice and humans**, *Sci. Transl. Med.*, vol. 10(462), eaat 9892, 2018.

DURÉE LIBRE

3 FORMULES AU CHOIX

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Pour la Science – Marketing – 170 bis boulevard du Montparnasse – 75 014 Paris – email : boutique@pouirlascience.fr

☒ **OUI, je m'abonne à Pour la Science en prélèvement automatique**

PAG20NOE

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher) et je complète l'autorisation de prélèvement ci-dessous.

☐

FORMULE PAPIER
 • 12 n° du magazine papier
 + **UN CADEAU**

4,90€
 PAR MOIS

DPV4E90K8

☐

FORMULE PAPIER + HORS SÉRIE
 • 12 n° du magazine papier
 + 4 Hors-série papier
 + **UN CADEAU**

6,50€
 PAR MOIS

PPV6E50K15

☐

FORMULE INTÉGRALE
 • 12 n° du magazine (papier et numérique)
 • 4 Hors-série (papier et numérique)
 • Accès illimité aux contenus en ligne
 + **UN CADEAU**

8,20€
 PAR MOIS

IPV8E20K15

2 / Mes coordonnées

Nom:
Prénom:
Adresse:
.....
Code postal

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

 Ville:
Tél.:

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

E-mail:@
(Indispensable pour la formule intégrale)
J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2021 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site <https://boutique.pourlascience.fr>. Photos non contractuelles. Vous pouvez acheter séparément chaque élément de cette offre : les numéros de *Pour la Science* pour 6,90 €, les numéros de *Pour la Science Hors-série* pour 7,90 € et le livre *Pourquoi le Soleil brille* pour 16,00 €.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et nous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société *Pour la Science*. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. *Pour la Science* ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à *Pour la Science*. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante: <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit «RGPD») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

Groupe Pour la Science - Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris cedex 14 – Sarl au capital de 32 000 € – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z

3 / Mandat de prélèvement SEPA

En signant ce mandat SEPA, j'autorise Pour la Science à transmettre des instructions à ma banque pour le prélèvement de mon abonnement dès réception de mon bulletin. Je bénéficie d'un droit de rétractation dans la limite de 8 semaines suivant le premier prélèvement. Plus d'informations auprès de mon établissement bancaire.

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom: Prénom:

Adresse:

Code postal | | | | | Ville: | | | | |

Désignation des comptes à débiter

Designation du compte a debiter

BIC (Identification internationale de la banque) _____

IBAN

(Numéro d'identification international du compte bancaire)

Établissement teneur du compte

Nom:

Adresse:

Code postal Ville:

Date et signature **Organisme Créancier: Pour la Science**

170 bis, bd. du Montparnasse – 75014 Paris
N° ICS FR92ZZZ426900

N° de référence unique de mandat (RUM)

4 / MERCI DE JOINDRE

IMPÉRATIVEMENT UN RIB Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire