

OFFRE DÉCOUVERTE

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE



1 AN - 12 N^{os}
59€ **24% d'économie**

2 ANS - 24 N^{os}
110€ **29% d'économie**

3 ANS - 36 N^{os}
159€ **32% d'économie**

BULLETIN D'ABONNEMENT

POUR LA SCIENCE

À renvoyer accompagné de votre règlement à : Pour la Science - Service abonnements - 19 rue de l'Industrie - BP 90 053 - 67 402 Illkirch cedex

☐ **OUI, je m'abonne à Pour la Science en formule Découverte :**

- ☐ **1 an • 12 numéros • 59€** au lieu de 78,50€ (D1A59E)
- ☐ **2 ans • 24 numéros • 110€** au lieu de 157€ (D2A110E)
- ☐ **3 ans • 36 numéros • 159€** au lieu de 235,50€ (D3A159E)

MES COORDONNÉES

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____

Ville : _____

Tél. : _____

Pour le suivi client (facultatif)

MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Par carte bancaire

N° _____

Date d'expiration _____ Clé _____

Signature obligatoire



PAS471B

Mon e-mail pour recevoir la newsletter Pour la Science (à remplir en majuscule). _____@_____

Grâce à votre email nous pourrions vous contacter si besoin pour le suivi de votre abonnement. À réception de votre bulletin, comptez 5 semaines pour recevoir votre n° d'abonné. Passé ce délai, merci d'en faire la demande à pourlascience@abopress.fr

J'accepte de recevoir les informations de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON et de ses partenaires ☐ OUI ☐ NON

Délai de livraison: dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31/01/17 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site www.pourlascience.fr. Conformément à la loi "Informatique et libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à Pour la Science.

IDÉES DE PHYSIQUE

Le doigt, un capteur universel

Pour reconnaître un matériau du bout des doigts, il ne suffit pas d'appuyer dessus. Il faut aussi balayer la surface : grâce aux frottements, des vibrations porteuses d'informations sont engendrées.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Le seul sens du toucher nous permet d'identifier avec les doigts la matière d'un objet, qu'il soit solide comme la soie, le bois, le coton ou le papier, ou liquide comme l'huile, l'eau ou le miel. D'où provient cette capacité sensorielle qui interpelle biologistes et physiciens, et fait rêver les roboticiens en quête d'une peau artificielle ? De la présence dans la peau de plusieurs types de terminaisons nerveuses, d'une imbrication du derme et de l'épiderme, et du rôle essentiel des empreintes digitales. Muni de cette structure et de cet arsenal de capteurs, le doigt détecte simultanément la température, la pression, le cisaillement, le relief, les vibrations ou encore la texture. Un capteur très polyvalent !

Chaud et froid, pression...

Touchons un objet avec nos doigts. Une première information que notre cerveau élabore à partir des signaux transmis par les terminaisons nerveuses libres de la peau est la sensation de chaud et de froid. Il s'agit là d'une information cruciale, car deux matériaux ayant la même température peuvent provoquer des sensations différentes : par exemple, nous percevons le bois comme chaud et le métal comme froid.

En réalité, nous sommes sensibles à la rapidité du transfert thermique entre notre peau et le matériau et à la variation

de température qui en résulte. Cela traduit l'« effusivité » du matériau, propriété qui combine sa conductivité thermique et sa capacité calorifique.

Par ailleurs, cette sensation de chaud ou froid nous renseigne aussi sur la rugosité du matériau. En effet, la surface de contact avec le doigt étant plus faible lorsque le matériau est rugueux plutôt que lisse, le transfert thermique est moins efficace : la surface paraît donc plus chaude. Cette sensation diminue cependant lorsque nous appuyons un peu plus avec le doigt, puisque la surface de contact augmente, grâce à l'élasticité de la peau.

Simultanément, nos doigts perçoivent les forces engendrées par l'enfoncement de la peau. La détection de ces pressions localisées, et par là-même l'identification des déformations spatiales de la surface, est possible grâce aux « disques de Merkel », des terminaisons nerveuses spécialisées.

La sensibilité des disques de Merkel et leur haute résolution spatiale sont optimisées par leur localisation, à la frontière entre le derme et l'épiderme. Cette frontière n'est pas plane, mais au contraire fortement ondulée. Le derme et l'épiderme ayant des élasticités différentes, les contraintes mécaniques présentes à ce niveau sont beaucoup moins uniformes qu'avec une interface plane. Elles ont tendance à se concentrer dans les zones les plus incurvées de la frontière, où le stimulus (la pression), ainsi amplifié, donnera un signal nerveux plus fort.

Les disques de Merkel ont un temps de réponse relativement long, adapté aux pressions continues. Ils sont complétés par les « corpuscules de Meissner », capteurs sensibles aux variations rapides du stimulus.

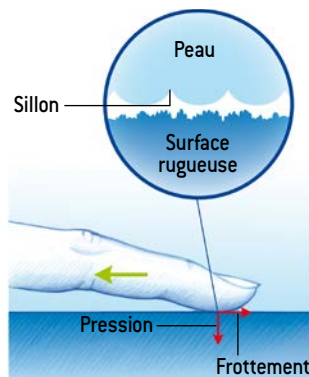
En pratique, le nombre et la disposition des disques de Merkel sont tels qu'ils nous informent sur des rugosités d'échelle supérieure à quelques dixièmes de millimètre. C'est largement suffisant pour lire le braille (les points des caractères ont une taille supérieure au millimètre) et pour identifier du papier de verre à gros grains. En revanche, lorsque la rugosité est plus fine, la résolution spatiale devient insuffisante : nous sommes incapables de distinguer, par une simple pression du doigt, des papiers de verre à grains fins mais différents.

Comment faire dans ce cas ? Nous savons d'expérience qu'il convient alors de



LORSQU'ON TOUCHE AVEC LES DOIGTS
une surface, la peau envoie au cerveau une multitude d'informations qui permettent d'identifier le matériau.

QUAND LE DOIGT BALAYE LA SURFACE d'un objet, une force de frottement s'exerce. Des vibrations sont ainsi engendrées, dont la fréquence dépend de la vitesse de balayage, de la taille caractéristique des aspérités de la surface et de l'écart entre deux sillons de l'empreinte digitale.



LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'université Pierre-et-Marie-Curie, à Paris. Leur blog : www.scilogs.fr/idees-de-physique

frotter la surface avec le doigt. En procédant ainsi, nous percevons tout d'abord l'intensité de la force de frottement. Cette force, parallèle aux surfaces en contact, engendre dans la peau des contraintes d'étirement et de cisaillement que détectent les « corpuscules de Ruffini », situés dans la profondeur du derme.

Cependant, le frottement en jeu n'est pas celui, habituel, qui s'exerce entre deux solides. Ce dernier dépend de la force pressante appliquée, mais pas de l'aire de contact (il s'agit des lois de Coulomb). Or avec le doigt, le frottement est du même type qu'avec du caoutchouc, c'est-à-dire que la force de frottement dépend de cette aire.

Cette différence est due au caractère élastique de la peau. Entre deux solides, à cause de la rugosité, le contact se limite en réalité à quelques points. La peau, elle, peut mieux épouser les rugosités micrométriques de la surface du matériau et assurer ainsi un contact beaucoup plus complet.

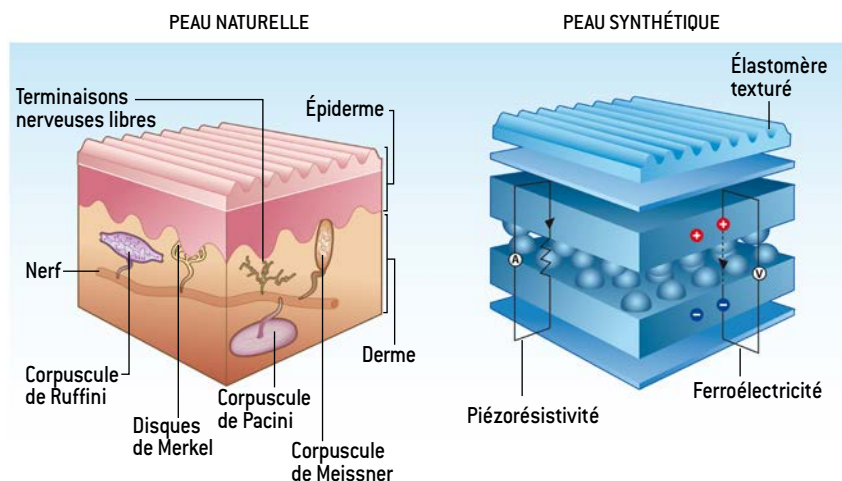
En outre, les mesures ont montré que lorsque le glissement commence, la force de frottement diminue ; et qu'au cours du glissement, cette dernière n'est pas constante, mais fluctue. Les caractéristiques détaillées de ces phénomènes dépendent de la rugosité des surfaces. Ce sont là aussi des informations que le cerveau peut exploiter.

Lorsque notre doigt balaye une surface, nos sensations dépendent crucialement de nos empreintes digitales. D'une part, ces dernières augmentent l'élasticité moyenne de la surface de la peau, en la rendant davantage déformable. D'autre part, elles engendrent, lors du glissement, des vibrations grâce auxquelles nous percevons les textures fines. En effet, lorsque le doigt se déplace, les plis de l'empreinte digitale suivent les creux et bosses de la surface et ce mouvement relatif engendre des vibrations.

Des vibrations de haute fréquence

La fréquence de ces vibrations dépend du type de rugosité. Si celle-ci est d'échelle supérieure à celle des empreintes digitales, la fréquence des vibrations est le rapport entre la vitesse de déplacement et la distance (un demi-millimètre environ) entre deux sillons consécutifs. Sinon, c'est l'échelle caractéristique de la rugosité qui intervient. Lorsque cette échelle est comparable à l'écart entre sillons, les vibrations sont amplifiées. Dans ce cas, pour des vitesses ordinaires de glissement du doigt,

EN S'INSPIRANT DE LA STRUCTURE de la peau naturelle (à gauche), des chercheurs sud-coréens ont réalisé un prototype de peau synthétique (à droite) sensible à la température, à la pression ainsi qu'aux variations rapides de cette dernière.



on obtient des fréquences de l'ordre de quelques centaines de hertz. Cela correspond à l'optimum de sensibilité des « corpuscules de Pacini ». Ces terminaisons nerveuses détectent en effet les vibrations de haute fréquence et les accélérations de la déformation de la peau, particulièrement présentes au début et à la fin du toucher. Leur résolution spatiale est en revanche très faible.

En s'inspirant de tous ces capteurs sensoriels, Jonghwa Park et ses collègues, des chercheurs sud-coréens, ont récemment conçu un prototype de peau artificielle capable de détecter les vibrations acoustiques, le pouls et la température du bras, et de distinguer différentes textures.

Leur dispositif (voir l'illustration page précédente, en bas) reprend les principales caractéristiques morphologiques de la peau

et comporte notamment deux réseaux de microdômes se faisant face, faits d'un matériau composite souple ayant des propriétés ferroélectriques et piézoélectriques.

La piézorésistivité (variation de la résistance électrique en fonction de la pression), accentuée par le contact plus ou moins étendu entre les deux réseaux de microdômes, permet de détecter la pression statique. Quant à la ferroélectricité (existence d'une polarité électrique spontanée, qui dépend notamment de la température et de la pression), elle permet de détecter la température et des variations de pression.

Les applications envisagées seraient des peaux synthétiques pour robots sensibles, mais aussi de nouveaux outils médicaux, par exemple des dispositifs portables de suivi de la température corporelle et de la pression artérielle. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

J. Park *et al.*, **Fingertip skin-inspired microstructured ferroelectric skins discriminate static/dynamic pressure and temperature stimuli**, *Science Advances*, vol. 1(9), article e1500661, 2015.

J. Scheibert *et al.*, **The role of fingerprints in the coding of tactile information probed with a biomimetic sensor**, *Science*, vol. 323, pp. 1503-1506, 2009.



Retrouvez la rubrique
Idées de physique sur
www.pourlascience.fr

Toutes les archives



■ Pour la Science
■ Dossier
Pour la Science
depuis
1996

Disponibles sur www.pourlascience.fr*

*Numéros à lire en ligne ou à télécharger au format PDF

QUESTION AUX EXPERTS

Pourquoi le ciel nocturne est-il noir et non pas brillant ?

La clé de l'énigme réside dans l'âge fini de l'Univers et dans le fait que les étoiles ne brillent pas éternellement.

Karen KWITTER



L'Univers semble statique. Dans toutes les directions, des astres distants nous envoient de la lumière. Dès lors, pourquoi leurs signaux ajoutés ne rendent-ils pas la voûte céleste brillante la nuit ? Cette question intrigue les astronomes depuis longtemps. Elle constitue le « paradoxe d'Olbers », car elle a été posée pour la première fois par l'astronome allemand Heinrich Olbers en 1823.

Olbers a formulé son paradoxe en ces termes : si l'on suppose que l'Univers est infini et qu'il contient une infinité d'étoiles (ou de galaxies) uniformément réparties, alors chaque direction d'observation devrait aboutir à la surface d'une étoile. La lumière qui nous parvient des astres devrait donc rendre le ciel nocturne aussi brillant que la surface d'une étoile. Or ce n'est pas le cas. Pourquoi ?

De nombreuses réponses ont été proposées à cette question bien plus profonde qu'il n'y paraît. L'une d'elles consiste à supposer que le milieu entre les étoiles, voire entre les galaxies, est rempli de gaz et de poussière qui absorbent la lumière des astres lointains. Mais cela ne résout pas le paradoxe d'Olbers, car la lumière absorbée par la poussière finirait par l'échauffer, de sorte que, *in fine*, elle rayonnerait autant que les astres lointains...

Une autre idée invoque l'expansion de l'Univers. La dilatation de l'espace allonge les longueurs d'onde des photons, les particules dont est constitué tout rayonnement électromagnétique. Cet effet, d'autant plus

prononcé que les photons proviennent d'un objet lointain, décale le spectre lumineux vers les grandes longueurs d'onde, c'est-à-dire vers le rouge.

Les longueurs d'onde du visible deviendraient ainsi... invisibles, puisqu'elles se situeraient dans l'infrarouge. Toutefois, le rayonnement ultraviolet des astres lointains devrait, lui, être décalé vers le visible. Or on constate que la luminosité du ciel nocturne dans le visible ne correspond pas à la somme du rayonnement ultraviolet des astres lointains. L'expansion de l'Univers ne suffit donc pas à expliquer pourquoi la nuit est noire.

Un univers infini, mais pas infiniment vieux

On considère aujourd'hui que le paradoxe d'Olbers s'explique par deux faits. Le premier est que, même si l'Univers est infiniment grand, il n'est pas infiniment vieux. Estimé par plusieurs méthodes, son âge est de l'ordre de 14 milliards d'années. Les données du satellite *Planck* ont d'ailleurs livré la valeur la plus précise à ce jour : 13,8 milliards d'années.

Ce point est essentiel : comme les ondes électromagnétiques se propagent à une vitesse finie d'environ 300 000 kilomètres par seconde, nous ne percevons la présence d'un astre lointain que si sa lumière a eu le temps de nous parvenir.

Ce délai de propagation des ondes lumineuses ne nous est pas familier, car, pour les distances habituelles, il est trop petit. Lorsque

nous assistons à un concert depuis un balcon suspendu, par exemple, la lumière indiquant que le chef d'orchestre situé à 30 mètres a levé sa baguette nous parvient en moins d'un dixième de millionième de seconde, ce qui est imperceptible. En revanche, lors des missions *Apollo*, les astronautes présents sur la Lune recevaient les messages du centre de contrôle situé sur Terre avec un décalage nettement perceptible de 1,26 seconde.

Ainsi, le temps de propagation augmente avec la distance et nous ne captions donc aucun signal lumineux émis à une distance supérieure à celle que la lumière a pu parcourir en 13,8 milliards d'années.

L'autre fait qui contribue à l'obscurité nocturne est que les étoiles et les galaxies ne sont pas éternelles. D'une part, elles n'ont pas toujours existé ; d'autre part, elles finissent toutes par pâlir, puis par cesser de briller.

La combinaison de l'âge de l'Univers et de la durée de vie finie des sources lumineuses qui le peuplent conspire avec la vitesse de la lumière pour limiter la portée de notre regard sur l'Univers. Ainsi, au contraire de ce que supposait Olbers, il nous sera toujours impossible de percevoir simultanément les émissions lumineuses de tous les astres lointains – puisque tous les rayonnements émis ne nous ont pas encore atteints et qu'une partie des sources de lumière se sont déjà éteintes. ■

Karen KWITTER est astronome au Williams College, dans le Massachusetts (États-Unis).