

Toucher digital humain et mécano-transduction

Alexis Prevost, Julien Scheibert

▶ **To cite this version:**

Alexis Prevost, Julien Scheibert. Toucher digital humain et mécano-transduction. L'Archicube , 2021, 30, pp.75-81. hal-03426575

HAL Id: hal-03426575
https://hal.science/hal-03426575

Submitted on 12 Nov 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Toucher digital humain et mécano-transduction

*Alexis Prevost*

Directeur de recherche au CNRS, il travaille au Laboratoire Jean Perrin (UMR 8237), Institut Biologie Paris Seine, Sorbonne Université (alexis.prevost@sorbonne-universite.fr).

*Julien Scheibert*

Chargé de recherche au CNRS, il travaille au Laboratoire de tribologie et dynamique des systèmes (UMR 5513), à l'École Centrale de Lyon (julien.scheibert@ec-lyon.fr).

La main humaine est un formidable outil qui nous permet d'interagir par contact direct avec le monde matériel qui nous entoure. Cet outil est si performant que, le plus souvent, c'est sans même y penser que nous réalisons quotidiennement, et avec une très grande dextérité, des tâches qu'aucun robot humanoïde actuel ne parvient à égaler. Nous pouvons par exemple saisir et manipuler plusieurs objets en même temps, des plus robustes aux plus fragiles sans les casser. Nous pouvons aussi identifier et trouver sans aucune aide visuelle un trousseau de clés dans un sac rempli d'objets de tailles et de formes variées [Billard]. Ces capacités remarquables résultent de l'intégration simultanée de différents types d'informations récoltées par la main. Il y a, d'une part, les informations dites proprioceptives que l'on obtient lorsque l'on détermine le poids et la forme d'un objet et qui requièrent la mesure des efforts qui s'exercent sur les muscles et les tendons de l'ensemble de la main et même du bras entier. Il y a, d'autre part, les informations de type cutanées qui renseignent sur le genre de matériau qui constitue l'objet touché ainsi que sur son état de surface. Elles impliquent un contact direct entre la peau et l'objet et mettent en jeu à la fois des mesures thermiques et mécaniques en surface de la peau. C'est ce mode d'exploration tactile auquel nous allons nous intéresser dans cet article, en nous focalisant plus précisément sur les aspects mécaniques et la manière dont les extrémités des doigts, les zones les plus sensibles de la main, peuvent évaluer l'état de surface d'un objet. Ce dernier, communément appelé texture, est souvent résumé par des termes vagues tels que rugueux, lisse, doux, collant ou glissant…

Le doigt comme organe tactile et ses performances

L'évaluation des performances d'un doigt comme organe tactile peut se faire en utilisant notamment ce que l'on appelle des expériences de psychophysique. Celles-ci consistent à recourir à l'utilisation de panels humains qui rapportent et notent l'intensité de leur perception pour un certain type de stimulus, par exemple la rugosité d'une surface. On a ainsi pu mettre en évidence que la perception de micro-aspérités présentes sur la surface d'un objet dépendait fortement du mode d'exploration, statique ou dynamique. Lorsque le doigt ne bouge pas relativement à la surface sondée (mode statique), des aspérités isolées de hauteur typique 0,1 à 1 millimètres peuvent être détectées par simple pression du doigt. En

revanche, dès que l'on fait glisser le doigt le long de la surface (mode dynamique), la limite de détection est considérablement améliorée. Il est ainsi possible de « sentir » une texture de type papier de verre dont les variations de hauteur ne sont de l'ordre que de quelques micromètres ! La « couleur tactile » associée à cette sensation nous permet ainsi de discriminer très finement différents types de rugosité.

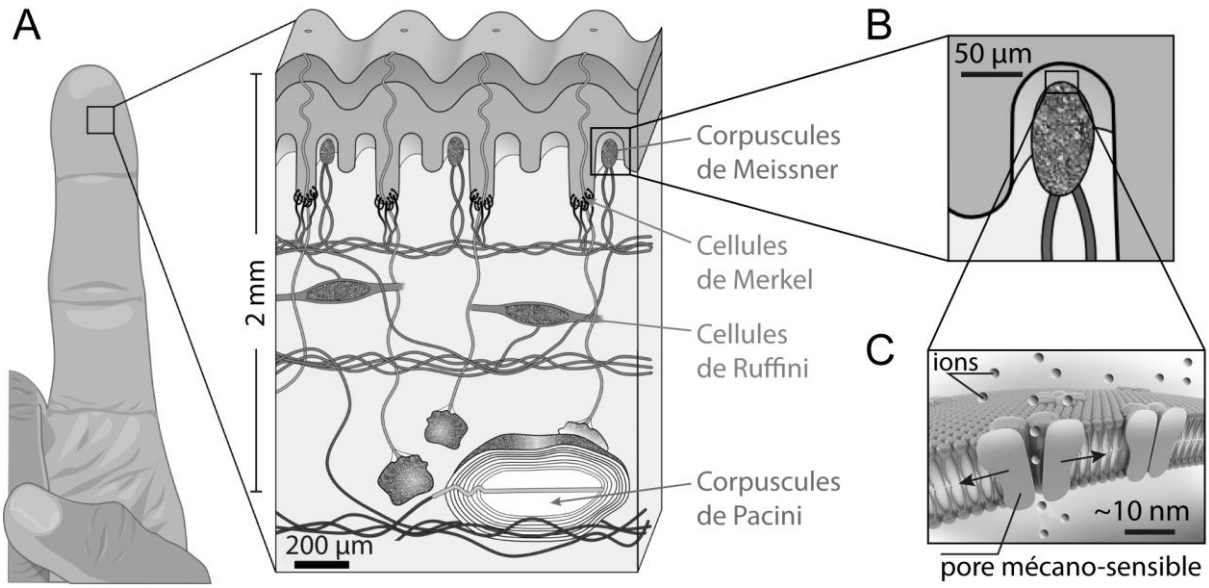


Figure 1. Toucher digital humain : de l'échelle macroscopique de l'organe tactile à celles microscopiques (cellulaire et moléculaire) du processus de mécano-transduction. **(A)** Coupe d'un doigt et détail des différents mécanorécepteurs sous la surface de la peau. **(B)** Zoom sur un mécanorécepteur (ici un corpuscule de Meissner). **(C)** Zoom sur la membrane d'un mécanorécepteur, décorée de pores protéiques mécano-sensibles. L'ouverture sous contrainte des pores permet le passage depuis l'extérieur vers l'intérieur du mécanorécepteur d'ions, à l'origine de la naissance d'un influx nerveux.

Le mécanorécepteur comme relais de l'information tactile

Au niveau physiologique, ces capacités tactiles remarquables résultent de la présence sous la peau du doigt de capteurs tactiles appelés mécanorécepteurs. Ce sont des terminaisons nerveuses mécano-sensibles qui transforment les déformations et les vibrations de la peau induites par la texture de l'objet sondé en séries temporelles d'impulsions électriques (appelés communément potentiels d'action) directement interprétables par le cortex somato-sensoriel, qui est la région de notre cerveau qui traite les informations périphériques provenant de la surface de notre corps. Chez l'Homme, ces mécanorécepteurs sont distribués à différentes profondeurs sous la surface de la peau dans l'épiderme et le derme (Fig. 1A) et sont au nombre de quatre que l'on peut regrouper en deux classes distinctes : il y a, d'une part, des mécanorécepteurs dits à adaptation lente, qui répondent essentiellement à l'intensité d'un stimulus (disques de Merkel, corpuscules de Ruffini) et dont on sait maintenant qu'ils sont impliqués dans le mode de détection statique évoqué plus haut. D'autre part, il existe des mécanorécepteurs à adaptation rapide, qui répondent plutôt aux variations temporelles d'un stimulus (corpuscules de Meissner, organes de Pacini), et qui jouent un rôle essentiel dans le mode de détection dynamique. Ces derniers se caractérisent notamment par une réponse qui dépend fortement de la fréquence du stimulus appliqué. Les organes de Pacini, par exemple, qui sont impliqués dans la détection de textures fines (comme

le papier de verre évoqué plus haut), ont une réponse en fréquence de type passe-bande qui est maximale pour une fréquence d'excitation d'environ 200 Hz.

Le toucher comme un problème de mécanique du contact

Cette structure de l'organe tactile nous indique donc que la grandeur mécanique directement responsable des signaux nerveux issus du doigt correspond à la déformation locale de la peau au voisinage des différents mécanorécepteurs. Comment cette déformation est-elle reliée à la texture de surface de l'objet sondé ? Ce problème peut être séparé en deux sous-questions distinctes. Premièrement, quel est l'état de déformation de la surface de la peau au cours de l'exploration ? Deuxièmement, comment cette déformation de surface se transmet-elle en profondeur jusqu'aux mécanorécepteurs ? Cette dernière question est une question de science des matériaux. Une fois décrites les différentes couches formant la peau, leurs épaisseurs et leurs propriétés mécaniques respectives, le filtrage opéré par la peau et reliant déformations en surface et en profondeur peut être modélisé relativement facilement. En revanche, la première question est bien plus complexe, car elle nécessite une description fine des interactions non seulement géométriques et mécaniques associées à la rugosité, mais aussi physico-chimiques (adhésion, frottement, lubrification par un troisième corps comme la sueur...) à l'interface entre la peau et les matériaux qui constituent l'objet. Il s'agit là, en fait, d'une question de mécanique du contact rugueux hétérogène, un domaine de recherche actuel très actif [Vakis] qui fait partie du domaine plus large de la tribologie (la science du frottement, de l'usure et de la lubrification). Au-delà du toucher humain, cette question se retrouve dans d'autres problèmes de la vie quotidienne, qui impliquent un matériau mou en contact avec une surface hétérogène. Citons par exemple l'adhérence et le frottement d'un pneu sur la chaussée, ou encore l'interaction homme-machine *via* un écran tactile.

Application de résultats de mécanique du contact connus pour le toucher

Si le phénomène de perception tactile digitale peut s'apparenter à un problème de mécanique du contact rugueux, que peut, en retour, nous apprendre la mécanique du contact sur les mécanismes de perception tactile ? Un premier résultat classique en mécanique du contact est que, plus on presse deux objets convexes l'un contre l'autre, plus la surface du contact apparent entre les deux solides est grande. Pour le doigt, cela signifie que la zone déformée de la peau est de plus en plus grande, et qu'un nombre croissant de mécanorécepteurs, qui participent à la construction de la représentation tactile de la surface touchée, est sollicité.

Un second résultat classique est que les interfaces de contact rugueuses satisfont, en première approximation, à la loi de frottement dite de Coulomb. Cette loi très générale stipule que la force de frottement, c'est-à-dire la force qui s'oppose au glissement de l'interface, est proportionnelle à la force qui compresse les deux solides l'un contre l'autre. Ce phénomène très intuitif explique pourquoi, pour porter un objet plus lourd, il faut le serrer plus fort dans sa main, ou pourquoi, lorsque cet objet semble nous glisser des mains, on resserre instinctivement la prise.

Moins classiquement, la mécanique du contact nous apprend que cette mise en glissement n'est pas un simple phénomène instantané, mais bien un processus progressif. Un glissement partiel s'initie dans les régions du contact qui sont soumises aux contraintes de pression les plus faibles. Ensuite, la zone glissante envahit progressivement la totalité du contact au fur et à mesure que la force exercée le long de l'interface augmente, via la propagation d'une onde de glissement. Récemment, il a d'ailleurs été montré que ce phénomène se produit de façon

analogue à l'interface de contact entre un doigt et une surface en verre [Delhaye]. Ce mécanisme de glissement partiel est susceptible de stimuler des mécanorécepteurs bien avant le glissement complet du doigt sur l'objet. On peut donc supposer que ces stimuli précoces sont utilisés par notre cerveau lors de la préhension d'un objet fragile.

Comme nous l'avons évoqué plus haut, la surface de la plupart des objets est rugueuse et un contact intime entre les deux objets ne se produit en fait qu'au niveau de leurs aspérités les plus hautes. Lorsque la pression reste raisonnable, l'interface de contact est donc constituée d'une multitude de microcontacts disjoints, au niveau desquels les contraintes de contact se concentrent. À l'extrémité des doigts, la peau elle-même est loin d'être lisse, et présente une topographie de surface bien particulière sous la forme d'empreintes digitales. Ce sont des sillons localement parallèles qui localisent les microcontacts existants au niveau des lignes de crête. Cette structuration particulière de la peau impose une périodicité spatiale caractéristique à la répartition du contact réel le long de l'interface. Lors du glissement du doigt sur un objet rugueux, les empreintes engendrent ainsi une périodicité temporelle des contraintes au niveau des mécanorécepteurs, en particulier les corpuscules de Pacini (autour des 200 Hz de leur sensibilité maximale). L'amplitude de ces oscillations est très importante, même lorsque la rugosité de surface n'est pas détectable en conditions statiques [Scheibert]. Les empreintes digitales, au-delà de leur importance pour augmenter la qualité de la prise [Yum] ou de leur utilité pour l'identification biométrique, jouent donc un rôle clé pour la détection et la discrimination de textures fines via un mécanisme de filtrage bien spécifique [Wandersman].

Un autre filtrage à l'échelle des mécanorécepteurs ?

Mais au fait, comment fonctionne un mécanorécepteur ? Pour y répondre, il faut se pencher sur sa structure microscopique. Très qualitativement, un mécanorécepteur est avant tout une cellule, qui possède donc une membrane qui l'isole du milieu extracellulaire (Fig. 1B), et dans laquelle sont insérées des assemblées de pores mécano-sensibles qui s'ouvrent en fonction de l'amplitude des contraintes mécaniques locales appliquées. Une fois ouverts, ces pores permettent le passage d'ions depuis le milieu extracellulaire vers l'intérieur de la cellule (Fig. 1C), ce qui permet, au-dessus d'un certain seuil, la génération d'un potentiel d'action. En particulier, on ne sait toujours pas clairement ce qui détermine la réponse fréquentielle des mécanorécepteurs à une stimulation mécanique vibratoire, ainsi que leurs capacités d'adaptation lente ou rapide. Comme nous l'avons évoqué plus haut, certains mécanorécepteurs à adaptation rapide comme les organes de Pacini possèdent en effet une sélectivité fréquentielle de type passe-bande. D'où leur vient donc cette remarquable propriété ? Celle-ci est-elle due à leur structure si particulière en onion (Fig. 1A) ou au contraire résulte-t-elle d'un couplage du mécanorécepteur avec son milieu extracellulaire, comme suggéré tout récemment par une étude sur un tout autre système que le doigt (le ver C. elegans) [Eastwood].

Conclusion et ouverture

La perception tactile chez l'Homme offre une parfaite illustration de la complexité des mécanismes mis en jeu, aussi bien macroscopiques (à l'échelle du doigt et de son interface de contact) que microscopiques (aux échelles cellulaires et moléculaires). En avoir une meilleure compréhension permettra probablement de mieux cerner la manière dont d'autres types de systèmes biologiques perçoivent leur environnement mécanique. Les rongeurs (rats, souris…)

par exemple, sont dotés d'une faible acuité visuelle et utilisent leurs longues moustaches faciales appelées vibrisses pour se repérer spatialement ou discriminer différents types de textures avec une très grande précision [Claverie]. Nous-même, nous utilisons notre langue pour détecter en bouche la présence de très petites particules indésirables ou discriminer de très faibles variations de texture d'un aliment [Thomazo1]. Cette capacité du système langue-palais est notamment due à la présence sur la surface de la langue de structures allongées (les papilles filiformes) qui fléchissent sous écoulement ou sous l'action de « chocs » avec les particules transportées par le flot [Thomazo2]. Dans les deux cas (vibrisses, papilles), la mesure des déflections est assurée par la présence en base de ces structures allongées, de mécanorécepteurs analogues à ceux du doigt. On voit donc au travers de ces quelques exemples choisis que le problème de la perception des contraintes mécaniques est un sujet d'étude très large qui s'étend à l'ensemble du règne animal et n'est pas seulement limité au toucher humain.

Références

[Billard] A. Billard, D. Kragic, Trends and challenges in robot manipulation, *Science* **364**, eaat8414 (2019).

[Claverie] L. N. Claverie *et al.*, Whisker contact detection of rodents based on slow and fast mechanical inputs, *Front. Behav. Neurosci.* **10**, 251 (2016).

[Delhaye] B. Delhaye *et al.*, Dynamics of fingertip contact during the onset of tangential slip, *J. R. Soc. Interface* **11**, 20140698 (2014).

[Eastwood] A. L. Eastwood *et al.,* Tissue mechanics govern the rapidly adapting and symmetrical response to touch, *PNAS* **112**, E6955 (2015).

[Scheibert] J. Scheibert *et al.*, The role of fingerprints in the coding of tactile information probed with a biomimetic sensor, *Science* **323**, 1503 (2009).

[Thomazo1] J.-B. Thomazo *et al.*, Probing in-mouth texture perception with a biomimetic tongue, *J. R. Soc. Interface* **16**(159), 20190362 (2019).

[Thomazo2] J.-B. Thomazo *et al.*, The Ciliated Structure as a Particle Detector, arXiv :2012.03832 (2021).

[Vakis] A.I. Vakis *et al.*, Modeling and Simulation in Tribology Across Scales: an Overview, *Tribol. Int.* **125**, 169 (2018).

[Wandersman] E. Wandersman *et al.*, Texture-Induced Modulations of Friction Force: The Fingerprint Effect, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 164301 (2011).

[Yum] S.-M. Yum, *et al.*, Fingerprint ridges allow primates to regulate grip, *PNAS* **117**, 31665 (2020)