



## Ce que prépare Neuralink

Le soir du 16 juillet 2019, Elon Musk et l'équipe de Neuralink organisaient à San Francisco une conférence pour présenter l'avancement des travaux de la startup créée en 2017. J'avais déjà commenté les objectifs de cette startups en mai 2017 dans **Ces startups qui veulent bidouiller votre cerveau – Neuralink**, et étais bien curieux de voir où ils en étaient deux ans après.

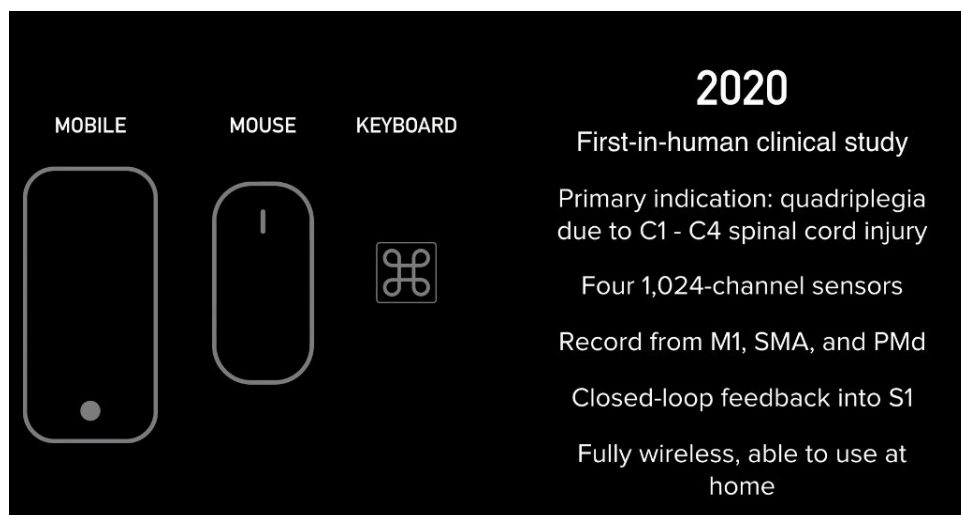
Il m'a fallu pour cela dépiauter la **vidéo** de la conférence en entier, la publication **An integrated brain-machine interface platform with thousands of channels** par Elon Musk et Neuralink, 2019 (12 pages) et la couverture presse associée dans la presse tech US. Voir notamment **Elon Musk unveils Neuralink's plans for brain-reading 'threads' and a robot to insert them – Not for humans yet** par Elizabeth Lopatto dans TheVerge, **Elon Musk's Neuralink looks to begin outfitting human brains with faster input and output starting next year** par Darrell Etherington dans TechCrunch et **Elon Musk's Neuralink hopes to put sensors in human brains next year** par Richard Lawler dans Engadget. Cela m'a permis de consolider un maximum d'informations et d'illustrations pour cet article.

La présentation de Neuralink tournait autour d'une solution technique d'électrodes à base de fils souples implantables dans le cerveau par un robot et contrôlées par un circuit intégré dans un tout petit boîtier intégrable sous le crâne.

Les premières applications visent toujours en premier lieu la réparation de l'homme atteint de pathologies diverses comme la maladie de Parkinson, que l'on traite déjà avec des électrodes de stimulation profonde implantées dans le noyau sous-thalamique, le contrôle moteur de membres artificiels pour les personnes amputées via l'implantation d'électrodes autour du cortex moteur à la périphérie latérale du cerveau, l'épilepsie, les dystonies (contractions musculaires involontaires), les dépressions, les acouphènes et enfin, la restauration de la vue pour les aveugles ou de l'ouïe pour les sourds. De telles électrodes devraient aussi potentiellement permettre à des handicapés de contrôler un smartphone via des mécanismes voisins associés au cortex moteur. C'est l'inventaire fourni par Neuralink.

Chaque cas d'usage aura ses particularités : nombre de neurones à connecter, leur profondeur dans le cerveau qui peut compliquer la tâche et leur cartographie précise pour la réussite des implantations. Toutes ces considérations n'ont pas été évoquées dans la conférence de Neuralink.

Neuralink n'en est pas encore à l'étape de la commercialisation de sa solution. Ils l'ont pour l'instant testée sur des rats et des singes. Ils ambitionnent d'obtenir l'agrément FDA pour la tester sur des humains d'ici fin 2020, en partenariat avec l'Université de Stanford et pour traiter des quadraplégiques.



L'étape suivante serait "l'augmentation" des capacités de personnes non handicapées, par la connexion directe du cerveau avec une IA. Elle est bien entendu à la fois bien plus lointaine dans le temps, pas spécialement documentée et plus incertaine. Et Elon Musk veut nous rassurer : *"This is not a mandatory thing, this is something you can choose to have if you want."* Encore heureux ! En fait, ce n'est pas rassurant du tout, même présenté sous cet angle.

Au-delà de l'intérêt médiatique classique, la conférence avait comme autre objectif de faciliter les recrutements. A ce jour, la startup a obtenu \$158M de financements, les deux tiers provenant d'Elon Musk et elle a 90 collaborateurs. Son président est Max Hodak.

Ces annonces vont certainement occuper pendant quelques trimestres nos amis singularistes et, dans un autre registre, Laurent Alexandre qui sollicite déjà ses suiveurs sur Twitter pour leur demander leur avis sur Neuralink alors qu'ils n'ont probablement pas encore eu le temps de s'informer sur ce que contient l'annonce. N'est-ce pas un peu prématuré ? Ou alors est-ce un test des préjugés sur le sujet ?



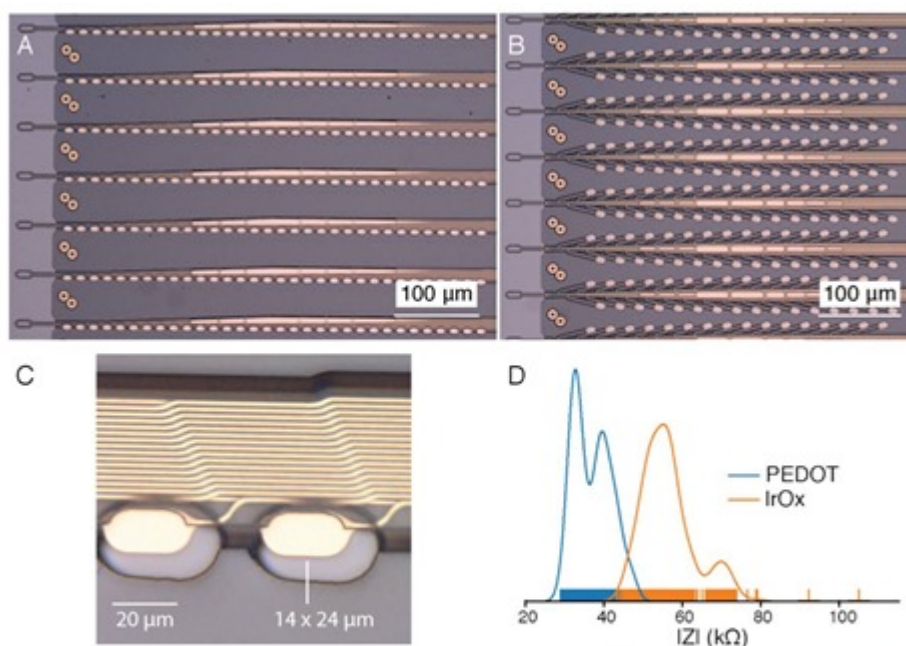
Cela vaut tout de même le coup de creuser les quatre technologies présentées par Neuralink : des électrodes intégrées dans des fils souples, un robot pour les implanter, un chipset pour les contrôler et du logiciel pour les exploiter.

## Electrodes

La connexion avec le cerveau passe par des électrodes qui servent soit à mesurer l'état d'excitation des neurones en évaluant les flux électriques qui les traversent soit en agissant dessus par stimulation électrique.

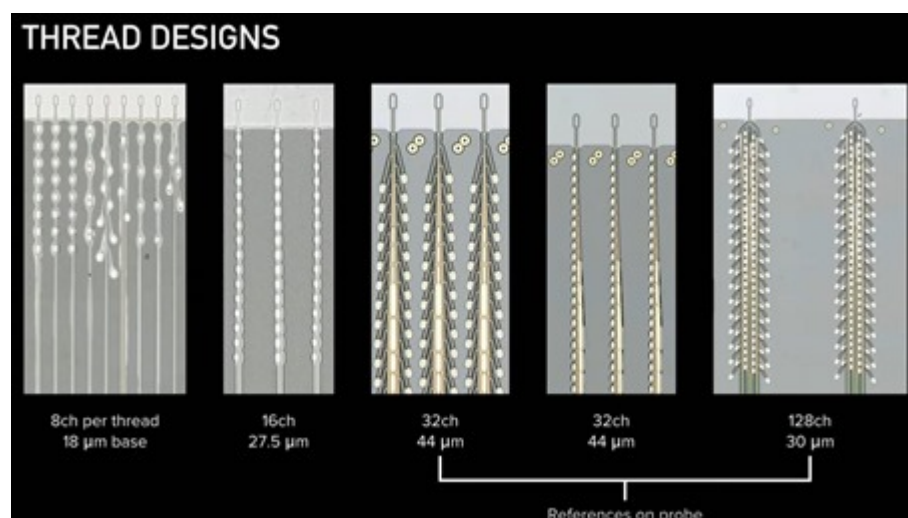
La principale nouveauté de Neuralink sont des électrodes miniaturisées intégrées dans des fils souples. Ces fils font un quart de l'épaisseur d'un cheveu et ont la taille d'un neurone. Vérification faite : le diamètre d'un cheveu va de 17 à 181  $\mu\text{m}$  selon les cas (*source*), le noyau d'un neurone a une taille variant entre 4 et 100  $\mu\text{m}$  et l'épaisseur des fils de Neuralink est comprise entre 4  $\mu\text{m}$  et 6  $\mu\text{m}$ . En comparaison, le diamètre d'un globule rouge est de 6  $\mu\text{m}$ .

Ils ont créé un prototype de 96 fils comprenant 3072 électrodes, donc 32 électrodes par fils. Ils présentaient deux formes de fils : une version linéaire (A) ou en arbre (B), voir *ci-dessous*.



**Figure 1:** Our novel polymer probes. **A.** "Linear Edge" probes, with 32 electrode contacts spaced by 50  $\mu\text{m}$ . **B.** "Tree" probes with 32 electrode contacts spaced by 75  $\mu\text{m}$ . **C.** Increased magnification of individual electrodes for the thread design in panel A, emphasizing their small geometric surface area. **D.** Distribution of electrode impedances (measured at 1 kHz) for two surface treatments: PEDOT ( $n = 257$ ) and IrOx ( $n = 588$ ).

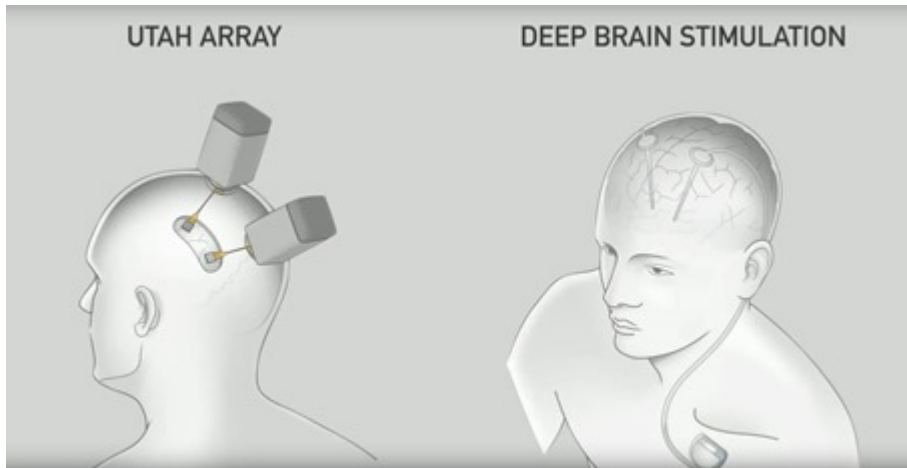
Sachant qu'ils ont imaginé une vingtaine de modèles qui correspondent à des géométries différentes de réseaux de neurones biologiques à cibler, et dont voici quelques exemples.



Ces fils d'électrodes sont fabriqués avec des techniques de lithographie voisines de celles de composants semi-conducteurs CMOS. Neuralink a même testé un procédé de fabrication simultané de la puce et des fils

d'électrodes sur un même wafer.

L'avantage de ces électrodes flexibles est qu'elles peuvent suivre sans l'endommager les mouvements internes du cerveau. Un corps souple dans un corps mou est moins dangereux qu'un corps dur dans un corps mou, vous suivez ? Ces électrodes seraient donc plus appropriées que celles de **BrainGate**, elles-mêmes issues de la société **Cybernetics** de l'Université d'Utah. Elles sont testées depuis 2002 aux USA, notamment à Stanford et visent à restaurer le contrôle de membres. Elles permettent d'implanter jusqu'à 128 électrodes.



Neuralink veut donc principalement faire croître l'ordre de grandeur du nombre de neurones contrôlables. Le modèle actuel de 3072 électrodes testé sur des rats pourrait passer à 10 000 électrodes, ce qui n'est pas en soi délirant comme progression. Cette technique serait meilleure que les systèmes actuels de stimulation pour les patients atteints de la maladie de Parkinson qui ne comprennent qu'une dizaine d'électrodes.

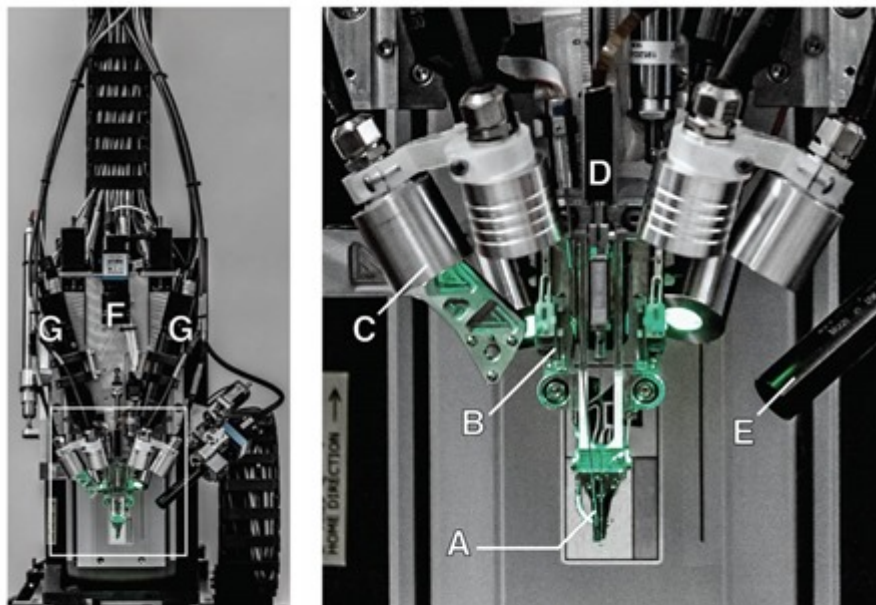
Il existe bien entendu quelques réserves face à cette technologie d'électrode. Elles semblent adaptées à la stimulation de colonnes corticales du cortex mais moins pour les différentes parties du cerveau limbique et profond, là où l'on traite la maladie de Parkinson. Des scientifiques se demandent aussi si leur structure peut résister au milieu biologique salin du cerveau. Neuralink a expliqué comment il protégeait le processeur évoqué plus loin mais pas les fils d'électrodes.

Enfin, ces électrodes mesurent seulement l'activité des neurones "par paquet" et sans grande précision. La mesure ne s'effectue pas du tout au niveau des connexions entre neurones, les fameuses synapses. Ces dernières sont 7000 fois plus nombreuses que les neurones dans le cerveau. Cela suffit toutefois pour les applications visées dans le domaine de la santé.

### **Robot d'implantation**

La seconde technologie présentée par Neuralink est une grosse machine capable d'implanter les neurones avec précision dans le cerveau. Sa conception n'est pas très détaillée. Dans la démonstration, le robot implante des fils d'électrodes sur un cortex cérébral de rat, après avoir percé des trous dans le crâne. Il implante 6 fils par minute, contenant 192 électrodes.

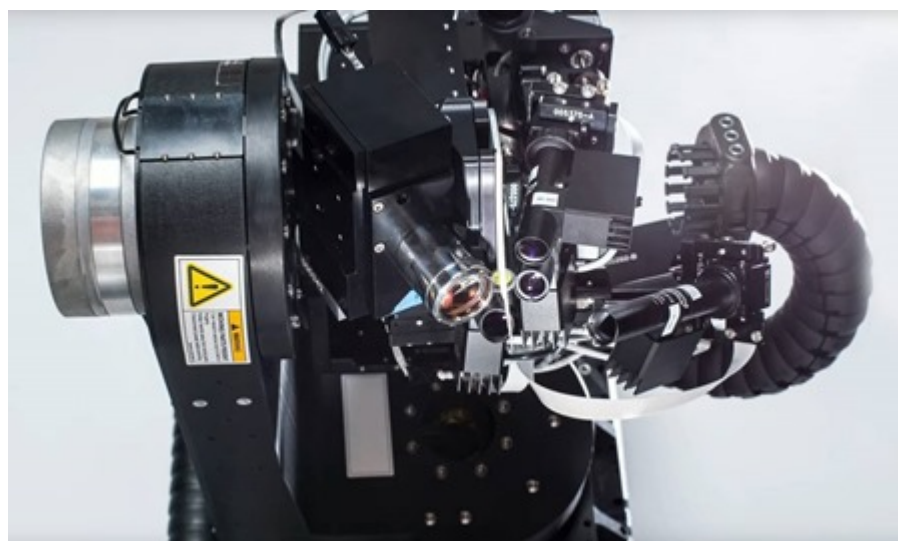




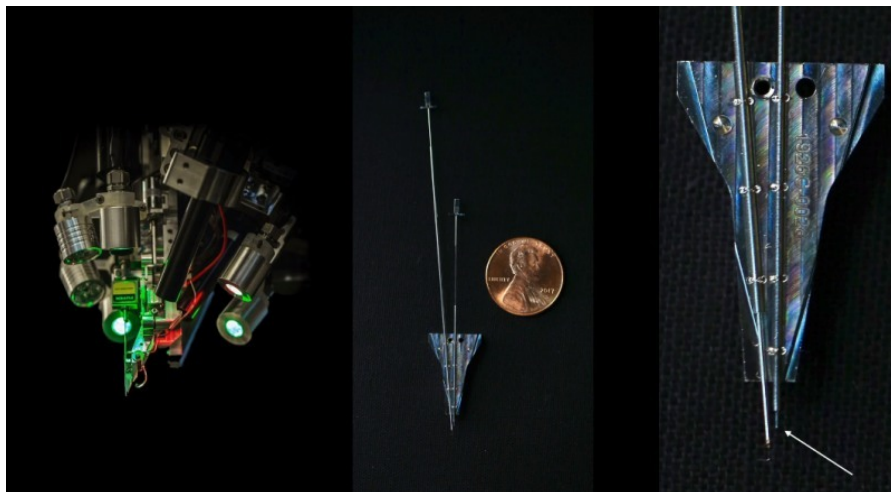
**Figure 3:** The robotic electrode inserter; enlarged view of the inserter-head shown in the inset. **A.** Loaded needle pincher cartridge. **B.** Low-force contact brain position sensor. **C.** Light modules with multiple independent wavelengths. **D.** Needle motor. **E.** One of four cameras focused on the needle during insertion. **F.** Camera with wide angle view of surgical field. **G.** Stereoscopic cameras.

Il n'implante pas ces électrodes au milieu du cerveau, n'étant visiblement pas doté d'un système d'imagerie permettant de naviguer "à vue" dans le cerveau.

Le robot a été à ce jour utilisé sur 19 animaux avec un taux de succès de 87%, soit 2,47 animaux chez qui cela n'a pas marché. La notion de succès se mesure à l'électrode près !

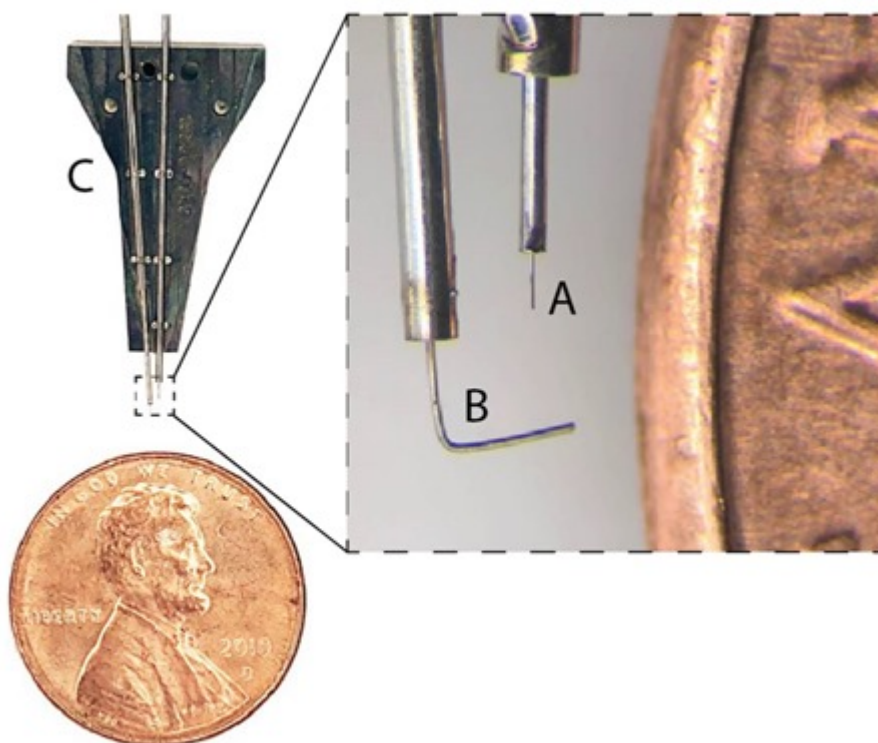


Neuralink pense pouvoir un jour utiliser un laser pour percer les trous dans la boîte crânienne en lieu et place de l'utilisation d'une mini-perceuse. L'idée est de rendre ce genre d'opération aussi banale qu'un LASIK, l'usage d'un laser de traitement de la myopie. L'objectif est aussi de se passer de l'anesthésie générale pour l'implantation. Mais c'est une promesse qui n'engage que ceux qui y tiennent car la solution technique reste à trouver. Elon Musk se comporte souvent comme Elisabeth Holmes de Theranos : il vend d'abord et essaye de faire ensuite, et il réussit... ou pas. Il y a deux ans, il indiquait par exemple que ses électrodes circuleraient dans le sang pour aller au bon endroit dans le cerveau !



Des tests d'implantation sur des humains sont censés démarrer d'ici fin 2020, avec des neurochirurgiens de l'Université de Stanford. Une fois l'agrément FDA obtenu, un processus qui dure en général au moins un an. On verra donc si cela intervient avant la commercialisation des Tesla autonomes de niveau 5 qui sont aussi prévues avant fin 2020.

Vu de près, le robot est une sorte de machine à coudre. La technique d'implantation des fils souples rappelle vaguement celle qui est utilisée couramment dans les capteurs de glycémie Freestyle d'**Abbott**. Le dispositif d'installation est un système qui projette une aiguille dans la peau au milieu de laquelle se trouve un fil permettant de faire de l'électrochimie du liquide interstitiel sous la peau. L'aiguille s'enfonce sous la peau avec le fil et se rétracte ensuite, laissant le fil dans la peau. L'aiguille reste attachée à un petit capteur extérieur de la taille d'une pièce de monnaie.

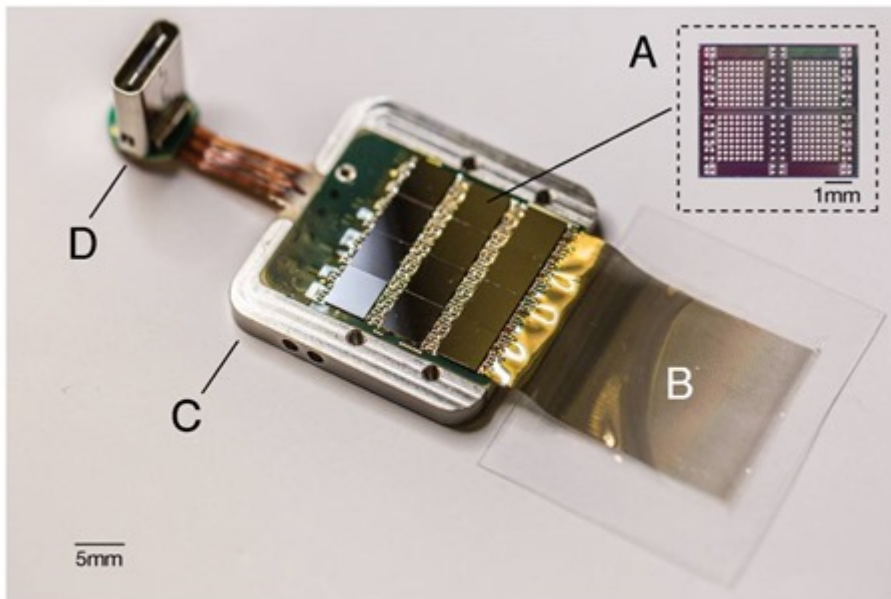


La manipulation réalisée par le robot de Neuralink a l'air un peu plus complexe et contrôlée par différentes caméras, sous la supervision d'un neurochirurgien.

### Electronique de contrôle

Troisième composante du système, un boîtier de contrôle des électrodes. Le dernier prototype, testé sur des rats,

contient 12 circuits ASIC (processeurs spécialisées) capables de traiter chacun 256 électrodes, soient les 3072 des 96 fils qui en sortent. Il est connecté à l'extérieur via un port USB-C. Ces ASIC sont assez simples : ils contiennent des amplificateurs et convertisseurs analogiques/numériques. Ils appellent cela un "pixel analogique".

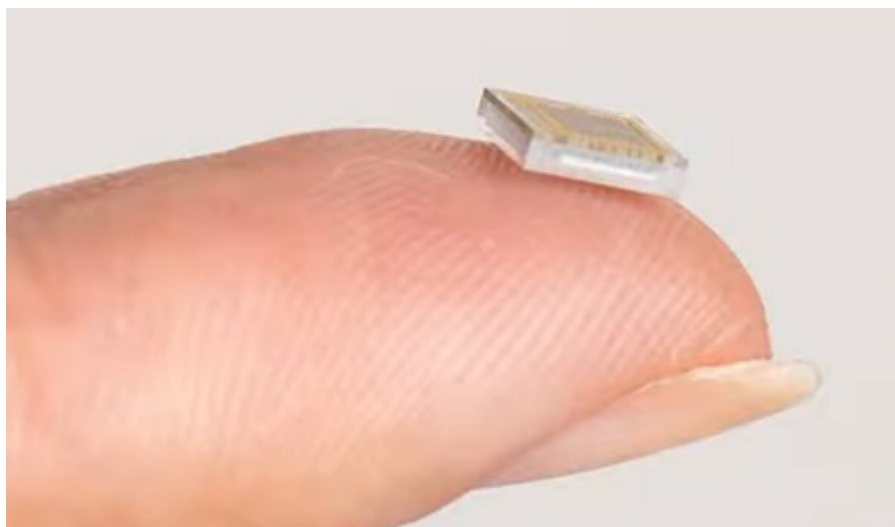


**Figure 5:** A packaged sensor device. **A.** individual neural processing ASIC capable of processing 256 channels of data. This particular packaged device contains 12 of these chips for a total of 3,072 channels. **B.** Polymer threads on parylene-c substrate. **C.** Titanium enclosure (lid removed). **D.** Digital USB-C connector for power and data.

L'ASIC est capable de détecter les impulsions neuronales ce qui procure un moyen de compression de la grande quantité d'informations captées par les électrodes

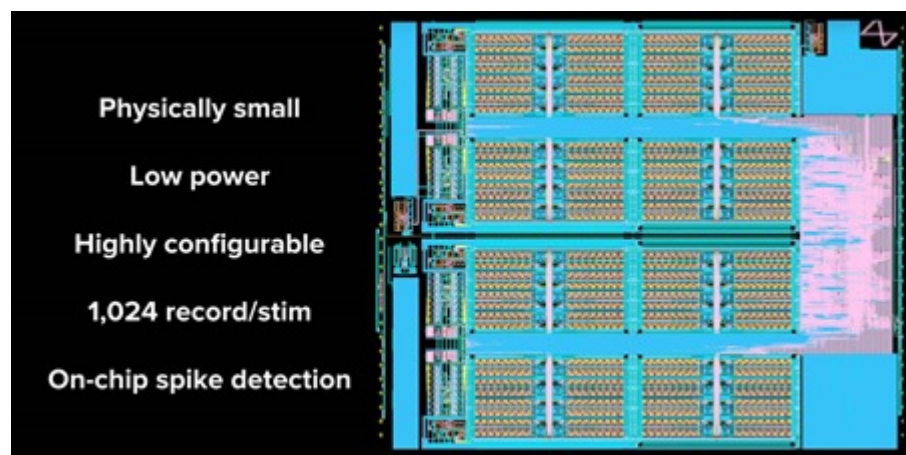


Ils échantillonnent l'information à une fréquence de 18,6 kHz avec une résolution de 10 bits. L'ASIC consomme seulement 750 mW. A titre de comparaison, un smartphone consomme environ 3 W. Mais cette puissance est indiquée pour un scénario d'enregistrement d'états de neurones, pas pour leur activation. La taille du boîtier de test est de 2,3 cm x 1,85 cm x 2 mm d'épaisseur.

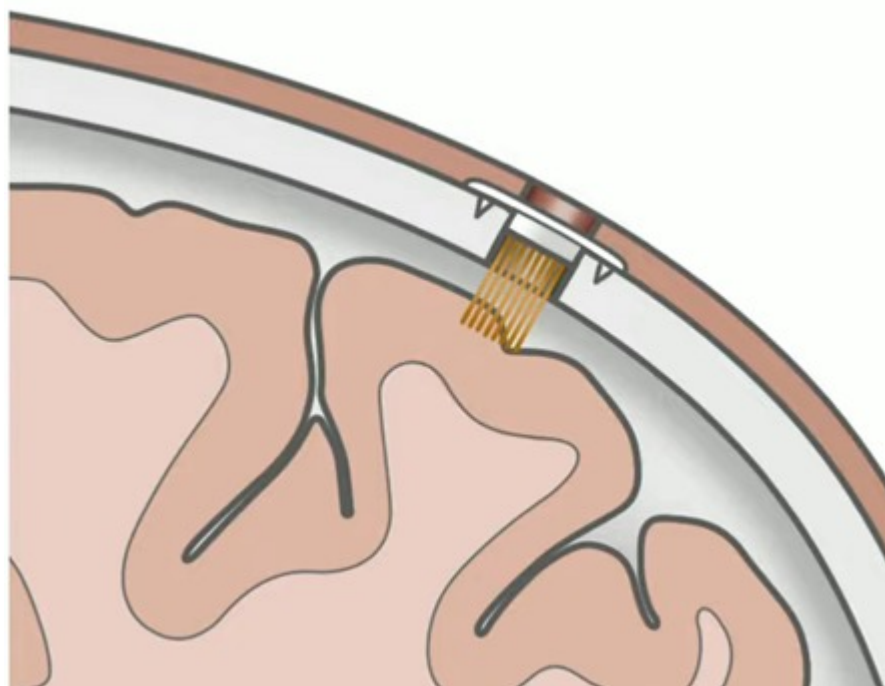




L'objectif est de miniaturiser tout cela sur une puce de 4 x 5 mm intégrée dans un packaging hermétique à greffer dans la tête.



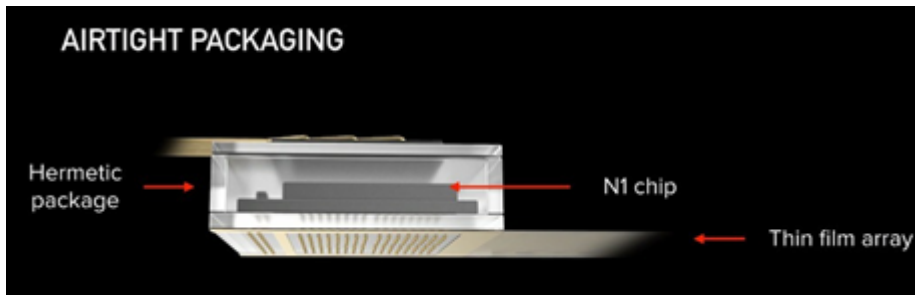
Ces puces sont conçues pour être implantées dans le corps humain. Elles seront connectées directement à une sorte de peigne d'électrodes à implanter dans le cerveau par le robot vu plus haut.



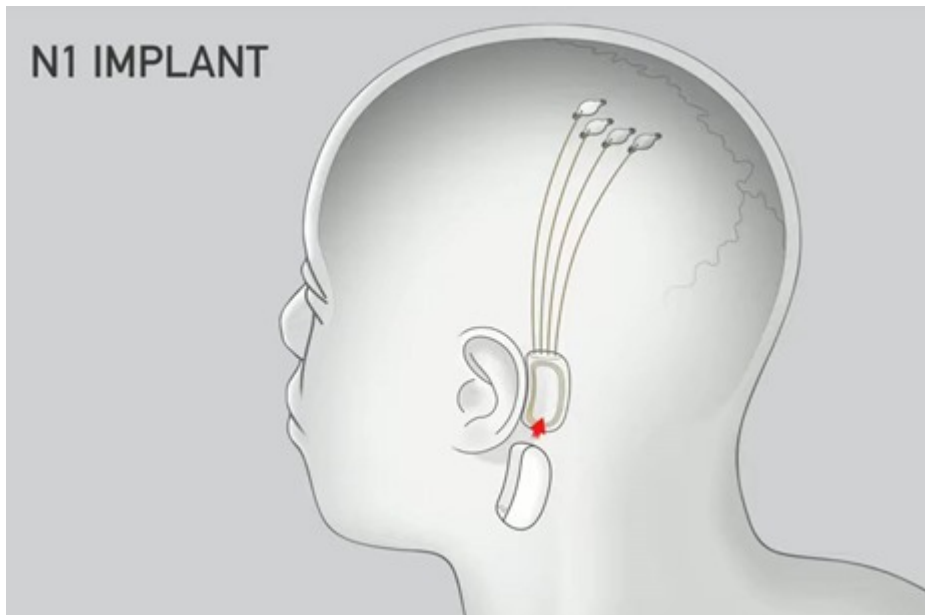
Elles seront ensuite reliées par un câble à un solénoïde plat installé à l'intérieur de la tête derrière l'oreille. Cela permettra de communiquer avec un appareil de réception équipé d'une batterie qui se place sur l'oreille, le **Link**, via une transmission sans fil non précisée (Bluetooth, Wi-Fi ?). Le solénoïde doit pouvoir servir à transmettre l'énergie d'alimentation des puces, comme pour recharger sans contact son smartphone en QiPower.

Les équipes de Neuralink indiquaient que cette architecture permettait de "débrancher" le système facilement, un moyen de calmer les peurs de contrôle du cerveau humain par une machine extérieure. A relativiser lorsque l'on sait à quel point il est facile de débrancher de son smartphone dans la vie courante !



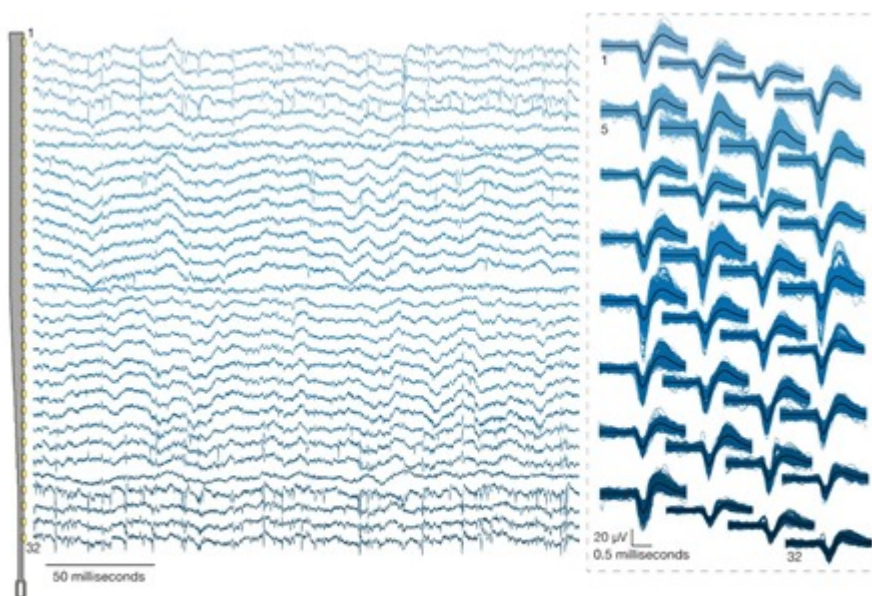


Neuralink prévoit dans un premier temps d'implanter jusqu'à quatre de ces puces : trois dans le cortex moteur et une dans le cortex somatosensoriel qui n'en est pas très loin. L'ensemble est ensuite contrôlé par une application de smartphone. Les ondophobiques devront évidemment s'abstenir... !



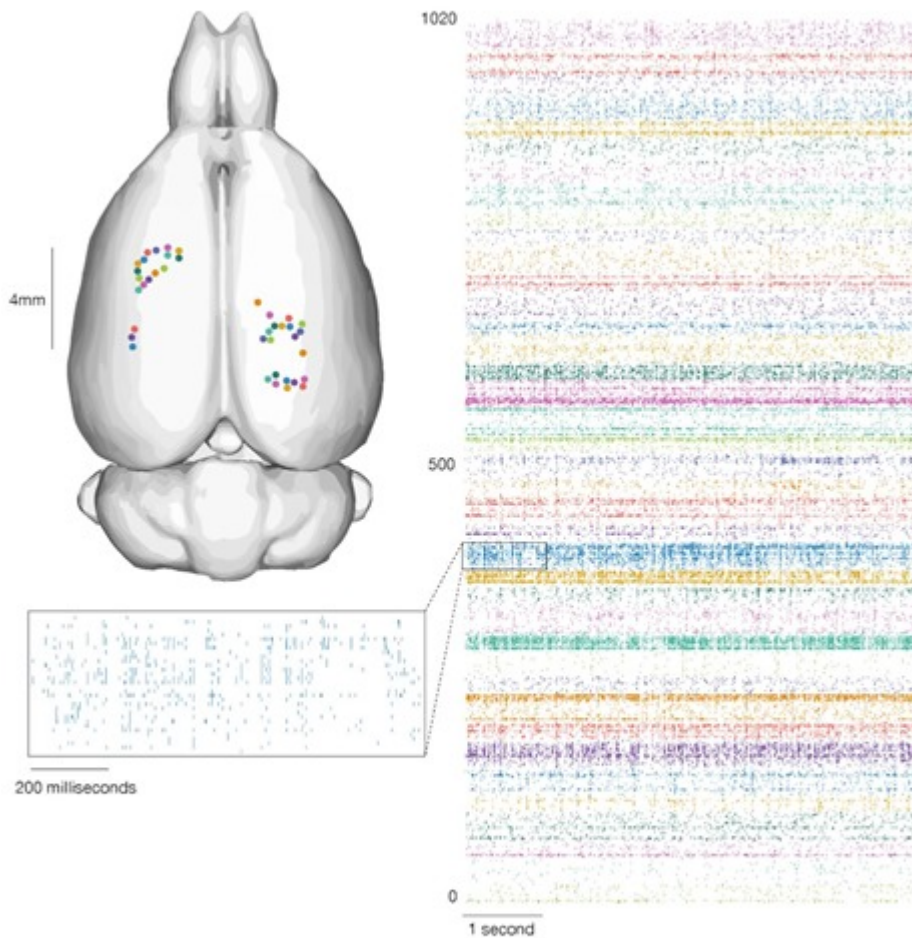
## Logiciels et algorithmes

C'est la partie la moins élaborées et documentée de la conférence de Neuralink. Ils présentaient des diagrammes d'activité neuronale obtenus sur des rats de laboratoire.



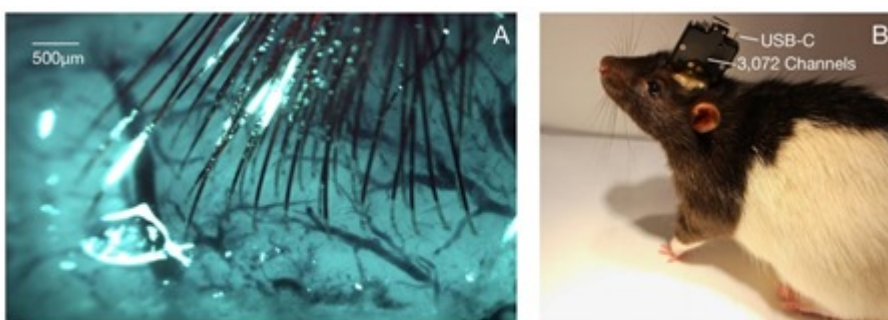
**Figure 7:** Left: Broadband neural signals (unfiltered) simultaneously acquired from a single thread (32 channels) implanted in rat cerebral cortex. Each channel (row) corresponds to an electrode site on the thread (schematic at left; sites spaced by 50  $\mu\text{m}$ ). Spikes and local field potentials are readily apparent. Right: Putative waveforms (unsorted); numbers indicate channel location on thread. Mean waveform is shown in black.

Des tests de captation avaient été réalisés dans plusieurs zones du cortex cérébral de ces rats.



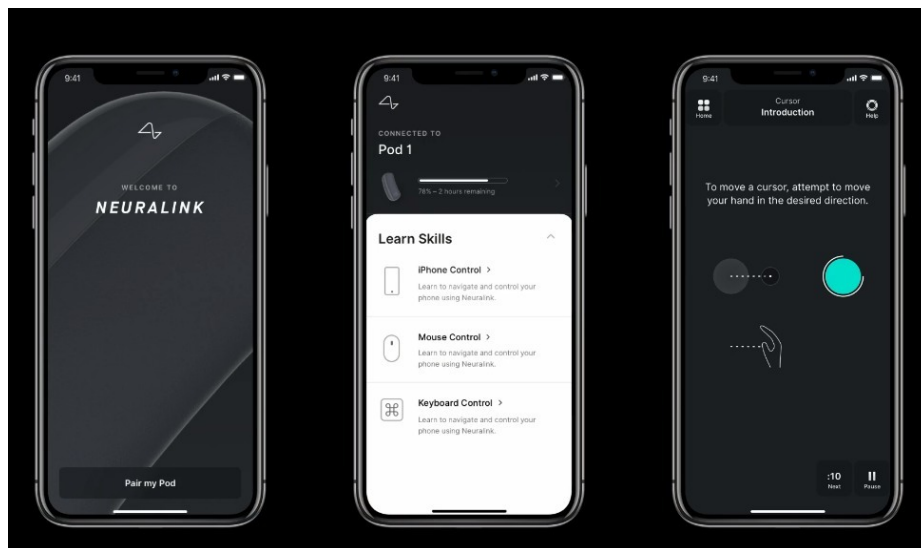
**Figure 8:** Our devices allow the recording of widespread neural activity distributed across multiple brain regions and cortical layers. **Left:** thread insertion sites (colored circles) are indicated on rendered rodent brain. [34] **Right:** raster of 1,020 simultaneously recorded channels, sorted per thread (color corresponds to insertion site). **Inset:** enlarged raster of spikes from a single thread. This thread corresponds to the one shown in fig. 7.

On peut même voir comment les fils sont implantés sur le cortex du cerveau de ces malheureux rats.



**Figure 6:** Thread implantation and packaging. **A.** An example peri-operative image showing the cortical surface with implanted threads and minimal bleeding. **B.** Packaged sensor device ("System B") chronically implanted in a rat.

In fine, Neuralink devrait développer des applications mobiles qui permettront de lire dans nos pensées pour éviter de passer par le clavier pour saisir un texte ou une commande pour lancer une action. C'est très éloigné d'une "liaison avec une IA". Il n'y a pas de liens avec une quelconque intelligence puisqu'il s'agit juste d'un moyen de saisie de lettres individuelles. Les électrodes ne permettent pas d'implanter le résultat de vos recherches web dans votre mémoire !



Ils envisagent aussi des actions bien plus sophistiquées pour contrôler nos humeurs, nous aider à résoudre des problèmes mathématiques et autres augmentations de l'intelligence mais cela semble assez *far-fetched* et très spéculatif. Par exemple, pour contrôler nos humeurs, il faudrait placer leurs électrodes avec précision au milieu du cerveau, dans les différentes zones déclenchant la production d'hormones comme celles du plaisir, de la peur ou de la satiété (thalamus, hypothalamus, hippocampe, amygdale, ...). Ils ne le font pas encore. Ce n'est pas forcément impossible à réaliser, mais c'est bien plus compliqué que la pose d'électrodes sur le cortex à la périphérie du cerveau. Je pense d'ailleurs, comme en 2017, que ce serait à la fois l'application la plus contestable et faisable de ces électrodes. Au départ, on contrôlerait les dépressions et autres PTSD (Post-Traumatic Stress Disorder) et à la fin, on contrôlerait les humeurs ! Le jour d'un vote, cela pourrait être utile !

## Impressions

L'approche de Neuralink relève d'un solutionnisme technologique pur et dur : ils développent une technologie en apparence assez générique sans trop se soucier dans le détail des domaines d'applications et questions qu'ils posent. C'est le propre d'un produit-plateforme ! Côté business, c'est bien vu.

Neuralink ne révolutionne pas tant l'état de l'art que cela, notamment dans la connaissance des mécanismes du cerveau. Ils proposent "juste" de l'innovation incrémentale en miniaturisation par rapport aux techniques existantes, telles que les techniques de traitement de la maladie de Parkinson ou les divers projets de contrôle de la marche pour tétraplégique comme celui du laboratoire de recherche **Clinattec** à Grenoble. De nombreux laboratoires dans le monde planchent sur la connexion avec le cerveau pour corriger divers handicaps. D'autres comme **Wandercraft** veulent rendre la marche à des personnes ayant perdu le contrôle de leurs membres inférieurs, mais sans passer par l'implantation d'électrodes dans le cerveau.

Comme je l'écrivais déjà en 2017, j'ai l'impression que Neuralink va surtout s'aventurer dans la réparation de handicaps avant de faire quoi que ce soit de plausible et d'acceptable dans la connexion cerveau/IA. Et quand bien même ils s'aventureront du côté de la connexion homme/machine pour augmenter le premier et contrôler la seconde, cela restera probablement dans l'étroit domaine des entrées/sorties. La cartographie du cerveau est trop complexe pour pouvoir directement écrire dedans comme vous faire mémoriser les Misérables ou un bouquin de mathématiques ou de physique quantique, ou même retenir les dernières dépêches de l'AFP ou votre fil d'actualité Twitter.

Prenons comme hypothèse 1% des synapses du cerveau, soient 6 trillions de connexion. Elles nécessiteraient avec la technologie de Neuralink l'usage d'un faisceau de fils dont la section ferait 0,187 m<sup>2</sup> soit un carré de 43 cm de côté. Et je ne vous dis rien des zetaoctets à récupérer ou envoyer ! Il faudrait diviser encore l'épaisseur des fils d'un facteur 10 voire 100 pour que cela soit acceptable ! J'ai compté les synapses et pas les neurones

car ce sont elles qui comptent pour définir la complexité des interactions entre neurones dans le cerveau. On pense qu'elles jouent un rôle important dans la mémoire.

La connexion de ces systèmes à une "intelligence artificielle" ne veut pas dire grand chose au-delà de scénarios vaguement accélérés d'interrogation de moteurs de recherche. Bref, avec ou sans BCI (brain connection interface), on en passera donc encore longtemps par les sens, qu'ils soient naturels ou augmentés. Mais je manque peut-être d'imagination !

Cet article a été publié le 17 juillet 2019 et édité en PDF le 22 décembre 2021.  
(cc) Olivier Ezratty – "Opinions Libres" – <https://www.oezratty.net>