



FONDS  
CLINATEC

Voyage de presse  
CEA / Fonds Clinatec  
le 27 juin 2024

Retombées presse

Septembre 2024



## Liste des journalistes présents au voyage de presse du 27 juin

<b>MEDIA</b>	<b>JOURNALISTE</b>
<b>Europe 1</b>	Yasmina Kattou
<b>Le Monde</b>	Laure Belot
<b>Le Point</b>	Anne Jeanblanc
<b>Les Echos (correspondant)</b>	Florian Espalieu
<b>Sciences et avenir La Recherche</b>	Lénaig Corderoc'h
<b>L'Usine Nouvelle</b>	Léna Corot
<b>Ca m'intéresse</b>	Nathalie Picard-Simonet
<b>Le Quotidien du Médecin</b>	Damien Coulomb

## Le Monde

11 SEPTEMBRE 2024

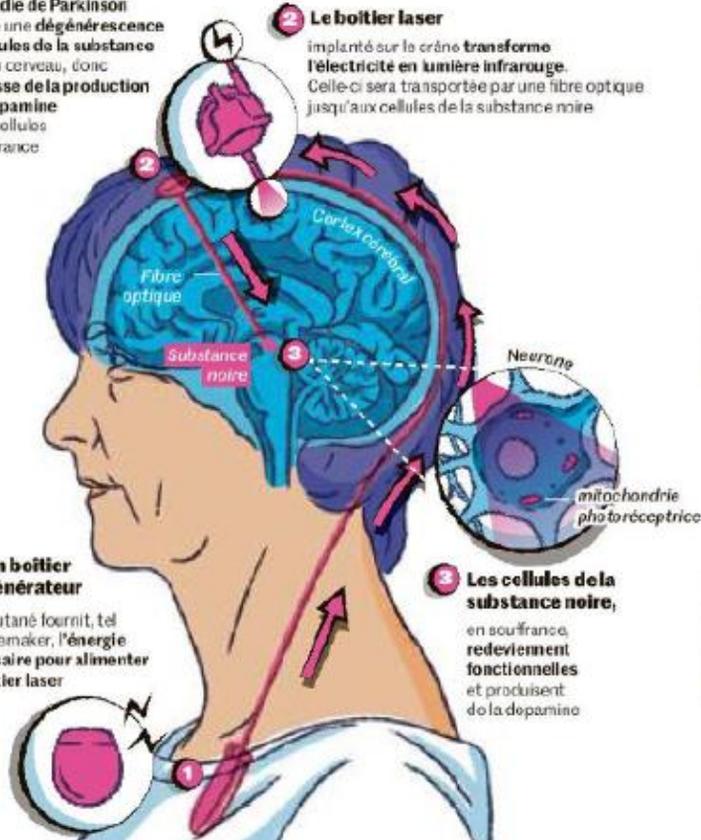
### DES INFRAROUGES POUR STABILISER LA MALADIE DE PARKINSON

La maladie de Parkinson entraîne une **dégénérescence des cellules de la substance noire** du cerveau, donc une **baisse de la production de la dopamine** par les cellules en souffrance

**2 Le boîtier laser** implanté sur le crâne transforme l'électricité en lumière infrarouge. Celle-ci sera transportée par une fibre optique jusqu'aux cellules de la substance noire

**1 Un boîtier générateur** sous-cutané fournit, tel un pacemaker, l'énergie nécessaire pour alimenter un boîtier laser

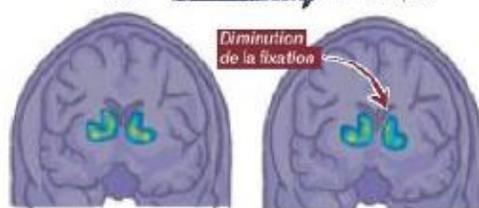
**3 Les cellules de la substance noire**, en souffrance, redeviennent fonctionnelles et produisent de la dopamine



Fixation du transporteur de la dopamine dans le cerveau de deux patients atteints de la maladie de Parkinson

mauvaise      très bonne fixation

**SANS IMPLANT**  
Jour 1 → 12 mois après



**AVEC IMPLANT**  
Jour 1 → 12 mois après



Les coupes de PET-scan cérébral attestent d'une **très bonne fixation de la dopamine** avec le traitement lumineux

Infographie : Le Monde, Laure Belot, Audrey Lagarde  
Sources : Clinatex, CEA, CHU Grenoble-Alpes

Le professeur Stéphane Chabardès, neurochirurgien à Clinatex (Grenoble), a présenté le 6 septembre, au 20<sup>e</sup> congrès mondial de neurochirurgie stéréotaxique et fonctionnelle de Chicago, des résultats inédits obtenus en utilisant

de la lumière infrarouge chez des patients parkinsoniens, une première. Alors que la maladie est due à un déficit de production cérébrale de dopamine, son équipe a découvert que cette lumière, acheminée par fibre optique,

agit sur les cellules de la substance noire du cerveau. Ces dernières « sont ravivées par l'énergie lumineuse, suppose-t-on, car elles produisent à nouveau de la dopamine », explique M. Chabardès. « Ce travail fait suite à plusieurs années

de recherche chez l'animal dans les laboratoires de Clinatex, par les chercheurs Cécile Moro et John Mitrofanis. » L'étude est en attente de publication dans une revue approuvée par des pairs. ■

LAURE BELOT

SCIENCES • NEUROSCIENCES

## Quand la lumière infrarouge stabilise la maladie de Parkinson

Un essai clinique français portant sur 12 patients montre qu'une stimulation cérébrale par proche infrarouge permet de relancer la production de dopamine. Des résultats prometteurs, présentés à un congrès international, vendredi 6 septembre, à Chicago.

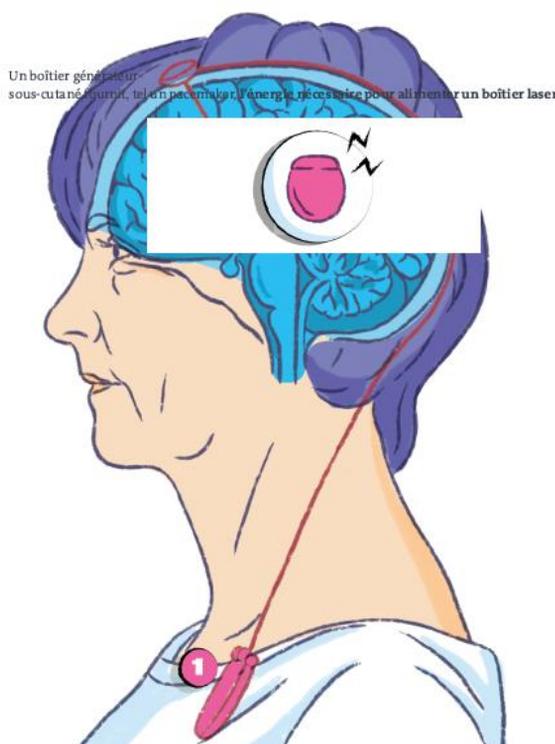
Par Laure Belot et Audrey Lagadec (infographie)

Publié hier à 07h00, modifié à 09h10 • Lecture 1 min.

Article réservé aux abonnés

Le professeur Stephan Chabardes, neurochirurgien à Clinatéc (Grenoble), a présenté, vendredi 6 septembre, au 20<sup>e</sup> congrès mondial de neurochirurgie stéréotaxique et fonctionnelle de Chicago (WSSFN), des résultats inédits obtenus en utilisant de la lumière infrarouge (plus précisément proche infrarouge, NIR) chez des patients atteints de la maladie de Parkinson, une première.

**La maladie de Parkinson entraîne une dégénérescence des cellules de la substance noire du cerveau, donc une baisse de la production de la dopamine par les cellules en souffrance**

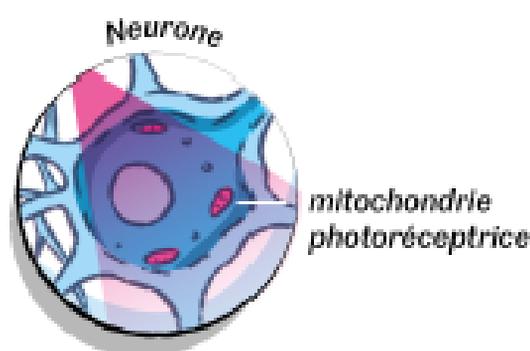


Le boîtier laser

implanté sur le crâne **transforme l'électricité en lumière infrarouge**. Celle-ci sera transportée par une fibre optique jusqu'aux cellules de la substance noire



Les cellules de la substance noire, en souffrance, **redeviennent fonctionnelles** et produisent de la dopamine



Sources : Clinatéc, CEA, CHU Grenoble-Alpes

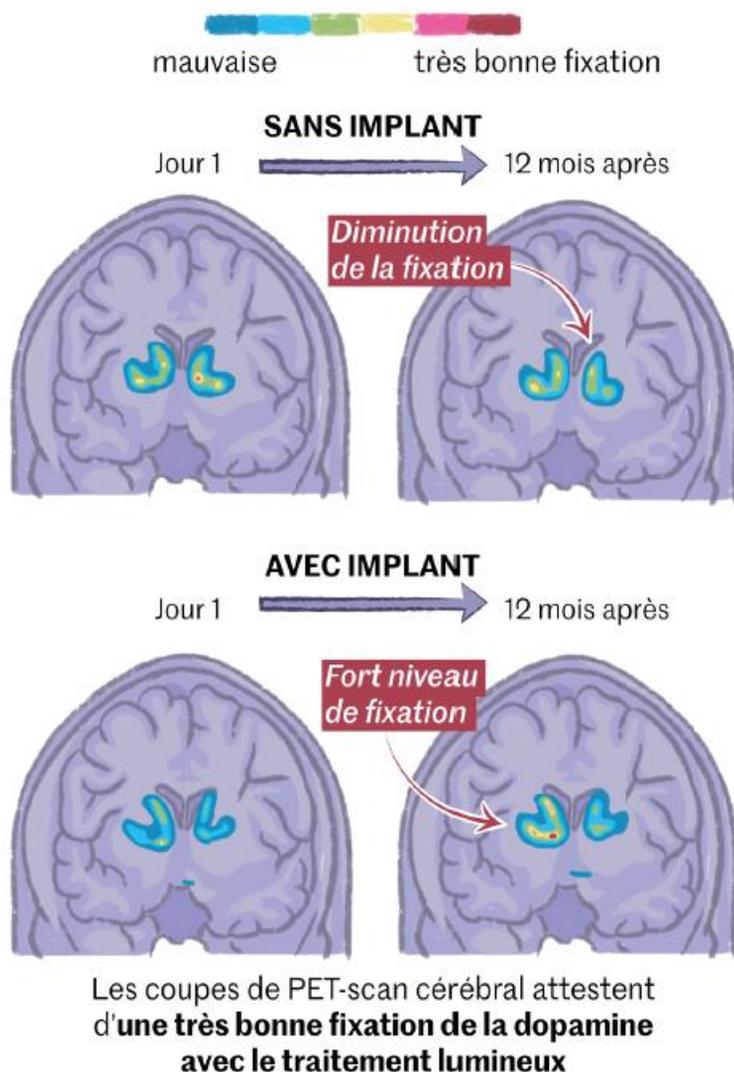
Infographie : *Le Monde*

Alors que cette pathologie est due à un déficit de production cérébrale de dopamine, son équipe a découvert que cette lumière, acheminée par fibre optique au centre du cerveau, agit sur les photorécepteurs des mitochondries des cellules de la substance noire. Ces dernières, qui sont atteintes progressivement dans le processus dégénératif de la maladie, *« sont revigorées par cette énergie lumineuse, suppose-t-on, car elles produisent à nouveau de la dopamine »*, explique le professeur Chabardes. La fibre optique est reliée à un boîtier laser, implanté en surface du crâne. *« Ce travail fait suite à plusieurs années de recherche chez l'animal dans les laboratoires de Clinatéc, par la docteure Cécile Moro et le professeur John Mitrofanis. »* L'étude est désormais en attente de publication dans une revue approuvée par des pairs.

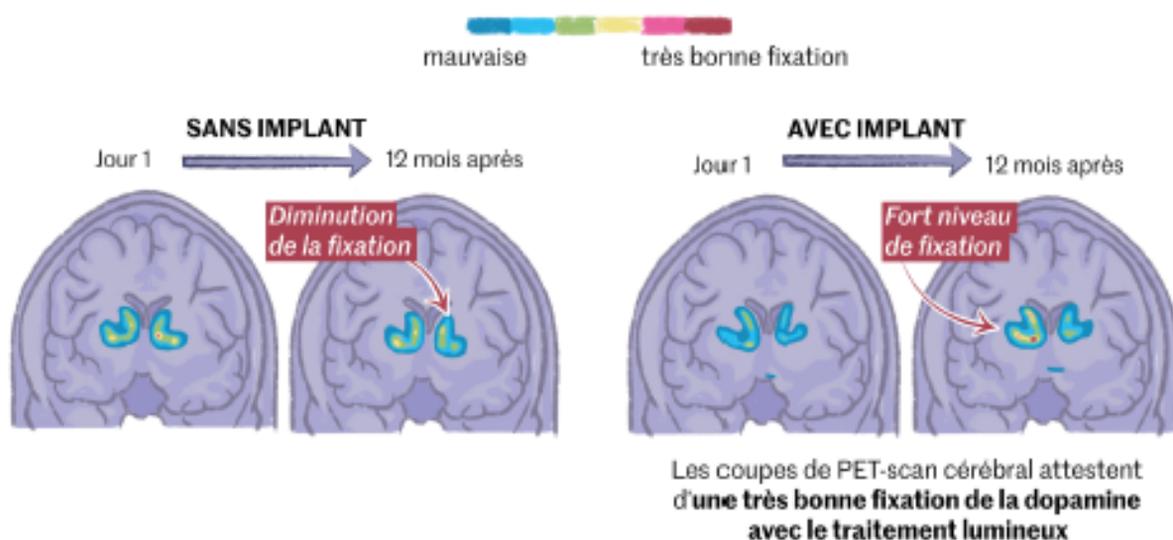
### « Une équipe à la fois créative et sérieuse »

L'essai clinique a été réalisé sur douze personnes, la première moitié étant stimulée par infrarouge tout en recevant un traitement oral de L-dopa, la seconde ne prenant que les médicaments. Deux patients supplémentaires devraient être inclus cet automne. *« Nous avons choisi des personnes entre 30 et 60 ans encore à un stade précoce de la maladie »*, explique M. Chabardes. *« Il faut rester prudent, car nous ne savons pas encore si cet effet est pérenne ou si ces cellules vont s'épuiser vite »*, poursuit-il. *« Pour autant, les progrès sont visibles et ont grandement soulagé les patients concernés [tremblements, raideur...]. C'est la première fois que l'on observe une stabilisation de la maladie. »* Pour rappel, c'est à Grenoble qu'en 1987, sous l'impulsion du neurochirurgien Alim Louis Benabid et du neurologue Pierre Pollak, naissait un premier espoir de traitement de la maladie de Parkinson avec la stimulation cérébrale profonde (SCP), devenue depuis un traitement de référence utilisé par environ 250 000 patients dans le monde.

## Fixation du transporteur de la dopamine dans le cerveau de deux patients atteints de la maladie de Parkinson



## Fixation du transporteur de la dopamine dans le cerveau de deux patients atteints de la maladie de Parkinson



Infographie : Le Monde  
Sources : Clinattec, CEA, CHU Grenoble-Alpes

Présente à Chicago, la neurochirurgienne Carine Karachi, de l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière, à Paris, est enthousiaste. « Cette étude, spectaculaire, provient d'une équipe à la fois créative et sérieuse », note-t-elle. « Les cellules de la substance noire [environ 400 000 neurones] sont particulièrement fragiles chez l'être humain et nous n'en connaissons pas la raison. Par contre, lorsque le diagnostic de la maladie de Parkinson est posé, nous savons que 70 % d'entre elles souffrent et ne produisent plus de dopamine », explique la docteure Karachi. L'approche grenobloise lui semble d'autant plus intéressante qu'« elle semble entraîner un arrêt de l'aggravation de la maladie et permet de restaurer au moins en partie la production de dopamine ».

Lire aussi | [Parkinson: une étude chez l'homme suggère l'effet protecteur d'un antidiabétique](#)

Laure Belot et Audrey Lagadec (infographie)

## Soigner le Parkinson par la lumière, premières données probantes

À Grenoble, les chercheurs du centre Clinatec ont obtenu la première preuve de concept chez l'humain que la photobiomodulation ralentit, voire réduit, des symptômes liés à la maladie de Parkinson.

C'est un résultat important que les chercheurs du centre de recherche grenoblois Clinatec (voir encadré) ont communiqué à la presse française en juin en amont de leur présentation au congrès World Society for Stereotactic and Functional Neurosurgery (WSSFN) à Chicago du 3 au 6 septembre. Il s'agit des premières données prouvant le ralentissement des symptômes de la maladie de Parkinson grâce à la photobiomodulation intracrânienne, chez les trois premiers patients implantés. Une amélioration fonctionnelle significative de la marche a même été observée par les équipes du Pr Stephan Chabardes, chef du service de neurochirurgie au CHU Grenoble Alpes.

Le neurochirurgien a greffé, chez trois patients suivis entre 24 et 36 mois, tous répondeurs à la L-Dopa, un implant mis au point avec la société Boston Scientific. Ce dispositif se compose d'un boîtier, d'où sort une tige plongeant jusque dans les noyaux gris centraux dopaminergiques pour y délivrer des pulsations lumineuses d'une longueur d'onde de 670 nm (rouge), proche de l'infrarouge. La sonde s'allume pendant une minute, toutes les quatre minutes. Les cher-

cheurs n'ont pas tenté une illumination en continu pour épargner la batterie et éviter le risque d'épuisement des neurones exposés à la lumière.

### Des récepteurs à la dopamine plus actifs

Dans les différentes cohortes de patients, une fois la maladie diagnostiquée, les patients perdent environ 10 % de leurs récepteurs à la dopamine chaque année. Au cours de l'étude grenobloise, le nombre de récepteurs détectés par le PET-scan n'a pas diminué au cours des trois années de suivi et a même augmenté. Les tests fonctionnels montrent en outre une diminution de l'akinésie et de la rigidité. La consommation médicamenteuse a également reculé. Les scientifiques de Clinatec supposent qu'au moment du diagnostic, une bonne partie des quelque 60 à 70 % des cellules dopaminergiques supposées mortes sont en fait mourantes et sont revivifiées par l'exposition à la lumière.

L'étude clinique va poursuivre son recrutement jusqu'à inclure 14 patients nouvellement diagnostiqués divisés entre un groupe implanté immédiatement puis suivi pendant quatre ans, et un groupe suivi quatre

ans avant d'être implanté. « *Il faut rester prudent, mais c'est très encourageant*, estime le Pr Chabardes. *Nous ne savons pas si cet effet se prolongera dans le temps.* » Jusqu'à présent, les pistes de traitement restent insuffisantes : la stimulation cérébrale profonde ne ralentit pas la progression de la maladie, car les neurones dopaminergiques continuent à dégénérer ; et deux études récentes publiées dans *The New England Journal of Medicine* ont échoué à démontrer l'efficacité des anticorps monoclonaux cinpanemab et prasinumab.

**L**a photobiomodulation stimule les mitochondries et restaure leur fonction. On évite ainsi la détresse du neurone, l'inflammation et la gliose ■

Jean-Philippe Bourgoin, directeur adjoint de la recherche technologique à Clinatec

### Mille nuances de photobiomodulation

La photobiomodulation fait partie des quatre grandes thématiques du centre de recherche Clinatec. Les trois autres sont l'interface cerveau-machine pour la réhabilitation fonctionnelle des handicaps

moteurs, la thermobiomodulation en prévention des crises dans l'épilepsie pharmacorésistante et la stimulation cérébrale profonde.

Les chercheurs explorent aussi la photobiomodulation extracorporelle cardiaque pour prévenir les conséquences de l'infarctus du myocarde et la photobiomodulation transcrânienne dans la maladie d'Alzheimer, la démence à corps de Lewy (une étude est en cours au CHRU de Strasbourg), les troubles du sommeil ou encore les traumatismes crâniens. « *La photobiomodulation stimule les mitochondries et restaure leur fonction, précise Jean-Philippe Bourgoïn, directeur adjoint de la recherche technologique à Clinattec. On évite ainsi la détresse du neurone, l'inflammation et la gliose.* »

Trois autres essais cliniques sont programmés pour 2025 pour étudier le timing d'utilisation de la photobiomodulation dans la prise en charge du traumatisme crânien. Enfin, Brigitte Piallat de l'institut des neurosciences de Grenoble mène pour sa part des essais précliniques sur des primates non humains dans les troubles du sommeil.

### **Les biophotons, un reflet de la santé mitochondriale**

Un autre programme de recherche, plus fondamental mené à Grenoble, concerne les biophotons. Selon des découvertes récentes, toutes les mitochondries sont capables de les émettre et les capter. En

2002, le chercheur allemand Fritz-Albert Popp, inventeur du terme biophoton, les définit par l'intensité de leurs émissions à la surface des tissus vivants, de l'ordre de 10 à 1 000 photons par cm<sup>2</sup> et par seconde.

« *Les biophotons sont des émissions de lumière extrêmement faibles, avec une longueur d'onde comprise entre 200 et 900 nm* », explique la chercheuse Jaimie Hoh Kam, recrutée par le fonds Clinattec pour développer un dispositif capable de dépister certaines pathologies telles que le diabète ou les pathologies cardiovasculaires, via les biophotons émis par un tissu donné. « *Les biophotons servent de moyen de communication entre les cellules, poursuit Jaimie Hoh Kam. Quand la mitochondrie fonctionne, elle produit un dérivé réactif de l'oxygène ; et quand elle vieillit ou devient dysfonctionnelle, elle produit moins d'énergie mais plus de ces dérivés, aux dépens de la cellule.* » En mesurant la quantité et la longueur d'onde des biophotons, Jaimie Hoh Kam espère mesurer également la santé mitochondriale d'un tissu.

Les cellules cancéreuses émettent ainsi des biophotons dont la longueur d'onde tend vers le bleu, alors que les cellules normales sont associées à une longueur d'onde proche du rouge. De même, un cerveau jeune émettra plutôt dans la gamme des rouges, tandis qu'un cerveau âgé émettra dans la gamme des bleus.

### **Le fonds Clinattec, à la recherche de 30 millions pour la médecine sans médicament**

L'institut de recherche Clinattec a été fondé en 2007, le bâtiment inauguré en 2012. Quant au fonds Clinattec, créé il y a tout juste 10 ans, il est désormais un opérateur de recherche centré sur l'application de la recherche en physique pratiquée au CEA au domaine de la santé. Son objectif : mettre au point des approches thérapeutiques non fondées sur des médicaments, et en particulier pour les pathologies du cerveau. Le centre bénéficie d'une organisation, qui a été longtemps unique au monde avec un espace dédié à l'ingénierie, un espace de recherche clinique et un espace d'accueil des patients en hospitalisation de jour.

Le centre rassemble plus de 700 chercheurs, auteurs de quelque 1 000 publications chaque année. Clinattec s'est récemment illustré en publiant les premières images de cerveau humain par son IRM 11,7 Tesla Yseult.

Le fonds Clinattec est dirigé par l'ancienne secrétaire d'État chargée des personnes handicapées, Sophie Cluzel. Le 28 novembre prochain, elle lancera, lors d'un dîner de bienfaisance à l'Atelier des Lumières, à Paris, un appel aux dons afin de collecter 30 millions d'euros pour concrétiser les ambitions de recherche d'ici à 2030. ■



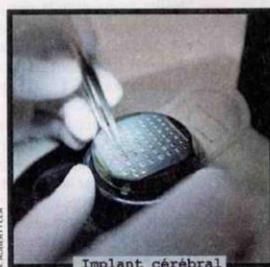


## DANS LE LABO QUI RÉPARE LE CERVEAU

À Grenoble, l'institut Clinatec étudie le cerveau. Du développement de dispositifs médicaux jusqu'à l'essai clinique sur l'homme, tout est réalisé sur place.

**A**

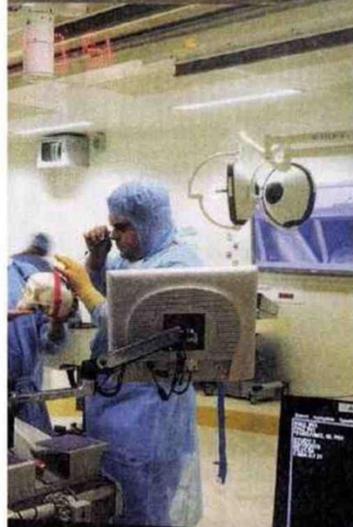
quelques pas de la gare de Grenoble (Isère), dans un bâtiment de 5810 m<sup>2</sup> situé dans une enceinte du Commissariat à l'énergie atomique (CEA), l'institut Clinatec dédie toute sa recherche au cerveau. Au rez-de-chaussée, la salle d'analyse du mouvement. C'est ici qu'en 2019, Thibault a démontré le fonctionnement de l'implant cérébral Wimage. Ce tétraplégique est parvenu à marcher et à faire bouger ses bras grâce à un immense exosquelette piloté par la pensée. Celui-ci trône toujours dans un coin de la pièce, accroché à un plafond équipé de nombreuses caméras servant à analyser précisément les gestes. En 2023, ce sont les images du Hollandais Gert-Jan contrôlant ses jambes par la pensée qui font le tour du monde, une réussite signée de chercheurs suisses. Le point commun ? Wimage, l'implant cérébral conçu par Clinatec, un centre de recherche biomédical créé par le CEA avec le CHU et l'université Grenoble Alpes. « Nous utilisons des modalités physiques pour traiter des pathologies lourdes du cerveau sans traitement médicamenteux », résume Jean-Philippe Bourgoin, le directeur adjoint de la recherche technologique du CEA. De la technologie utilisée à l'évaluation préclinique et jusqu'à l'essai clinique sur l'homme, toutes les étapes se déroulent dans ce bâtiment.



Implant cérébral

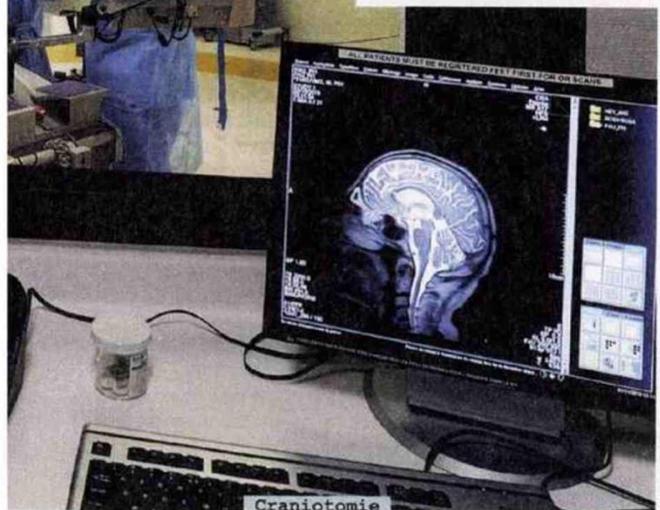
Le deuxième étage regroupe les salles où sont fabriqués les dispositifs médicaux. Exosquelette, bras robotisé et fauteuil roulant sont visibles dans ces espaces où la mécanique et l'électronique dominent. Une petite salle blanche permet de fabriquer les composants électroniques, comme les implants Wimage. D'autres sont bardées de machines médicales pour les analyses biologiques et les études précliniques. Dans l'une d'elles, les cerveaux congelés d'une souris, d'un rat et d'un primate sont visibles. Au troisième étage, rongeurs, primates et mini-porcs constituent une animalerie

L'institut Clinatec réalise, pour positionner des **implants cérébraux** Wimage, une opération appelée **craniotomie**. Avec ces implants, les intentions de mouvement sont enregistrées et traduites par des algorithmes d'IA pour que les patients puissent contrôler un **exosquelette** ou leur propre corps.



Exosquelette

A. ALBERT / CEA



Craniotomie

L. COROT / CEA

non visitable. De quoi tester la biocompatibilité des dispositifs médicaux. Cette organisation, assez unique quand le bâtiment est sorti de terre en 2012, a depuis été copiée, notamment aux États-Unis avec le labo Shirley Ryan AbilityLab, à l'hôpital de Chicago.

En mettant au point l'implant Wimagine, qui enregistre l'activité électrique cérébrale grâce à 64 électrodes, les ingénieurs en électronique du CEA ont accompli une véritable prouesse. « L'activité neuronale émet quelques dizaines de microvolts, que les circuits intégrés dans l'implant arrivent à détecter », décrit le responsable du programme cerveau-machine du CEA, Guillaume Charvet. Les données collectées sont transmises à un ordinateur pour être traduites en intention de mouvements grâce à des algo-

ritmes d'intelligence artificielle développés eux aussi en interne. Le tout en temps réel.

À quelques pas de la salle d'analyse du mouvement, un couloir d'hôpital aseptisé, donnant sur des chambres qui accueillent des patients de jour, débouche sur un bloc opératoire. Pour les visiteurs, cette salle chirurgicale de 90 m<sup>2</sup> (le double de celles des hôpitaux traditionnels) ne se découvre qu'à travers la grande vitre de la pièce adjacente. À droite de la table d'opération, l'un des tout premiers robots chirurgicaux Rosa, utilisé pour renforcer la précision des interventions sur le cerveau. C'est ici que Thibault a subi en 2017 une craniotomie de 5 centimètres de diamètre, durant laquelle deux morceaux d'os ont été retirés afin de « positionner les deux implants Wimagine à la

surface du cortex moteur droit et gauche », se remémore Guillaume Charvet.

Si ce premier essai clinique visait à démontrer le fonctionnement des implants et leur innocuité, les équipes de Clinatec planchent désormais sur des dispositifs du quotidien. Premier défi : miniaturiser l'ordinateur réalisant les calculs d'IA dans un dispositif accrochable à la ceinture. Ils réfléchissent aussi à « un système de stimulation neuromusculaire à positionner sur le bras pour que le patient attrape des objets », liste le scientifique. Des mouvements plus complexes à réaliser que la marche puisque le bras se déplace dans un environnement en 3D pour atteindre des cibles. « Le patient doit contrôler chaque muscle ! », s'exclame Guillaume Charvet. Une performance médicale pour réaliser des gestes quotidiens, par exemple saisir un verre d'eau. Les ingénieurs cherchent aussi à transformer l'encombrant casque qui permet aux implants de fonctionner en une casquette équipée d'antennes souples. Un premier exemplaire existe déjà.

#### TRAITEMENTS PAR LA LUMIÈRE

Au-delà des interfaces cerveau-ordinateur, Clinatec investit la lumière. Le neurochirurgien Stephan Chabardes a démarré le projet NIR (Near InfraRed), dont l'objectif est de ralentir l'évolution de Parkinson par photobiomodulation intracrânienne. Une maladie qui se traduit par « une dégénérescence de la substance noire avec perte des neurones à dopamine », rappelle-t-il. Pour la freiner, les chercheurs envoient une lumière proche infrarouge au plus près des cellules modales. Une sonde, développée à Clinatec, est insérée et positionnée au plus proche de la substance noire. En continu, elle émet pendant huit minutes de la lumière et s'éteint quatre minutes. Pour la tester, 14 personnes, diagnostiquées depuis moins de deux ans seront suivies pendant quatre ans.

La même piste est envisagée pour prévenir la maladie d'Alzheimer dans le projet Tiroc. Les effets de la lumière proche infrarouge, appliquée au moyen d'un casque, sont d'abord étudiés sur des patients sains. Puis un essai clinique inclura des patients malades. Des dizaines de personnes atteintes ou non de troubles neurologiques passent par Clinatec pour participer à des essais. L'espace patient est « organisé comme un service hospitalier », décrit le docteur Daniel Anglade. Avec une effervescence plus intermittente. **## LÉNA COROT**

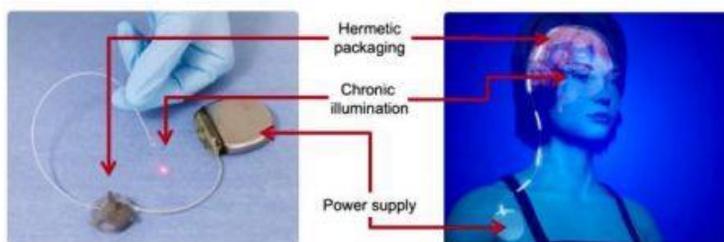
## Lumière sur la maladie de Parkinson : un dispositif implanté dans la tête du patient !

Un dispositif développé à Grenoble capable d'émettre une lumière infrarouge sur les neurones malades est implanté dans la boîte crânienne du patient pour freiner l'évolution de la maladie de Parkinson directement à la source !

"*Make the impossible possible*" : tel est le slogan du centre de recherche biomédicale Edmond J. Safra (Clnatec). Comme un espoir face à une maladie neurodégénérative qui touche plus de 8 millions de personnes autour du globe, le centre de recherche intégré au CEA de Grenoble développe l'utilisation de la **photobiomodulation intracrânienne** (lire l'encadré ci-dessous) pour ralentir l'évolution de la maladie de Parkinson : un projet porté par Cécile Moro, directrice de recherche au CEA, sobrement appelé NIR (Near InfraRed ou proche infrarouge en français).

### Qu'est-ce que la photobiomodulation intracrânienne ?

Derrière son appellation complexe se cache une technique thérapeutique innovante capitalisant sur les effets bénéfiques de la lumière pour améliorer la fonction cérébrale. Le dispositif NIR final, qui a fait l'objet de plus d'une dizaine de brevets, est constitué d'un stimulateur, qui fournit l'énergie implantée sous la clavicule du patient, d'un boîtier optique placé dans la boîte crânienne et d'une fibre optique passée dans les ventricules du cerveau délivrant la lumière infrarouge au niveau de la substance noire.



Implantation d'un dispositif NIR

*Implantation d'un dispositif NIR. Crédits : CEA-Leti / 2021*

## Maladie de Parkinson ou "maladie de l'énergie"

Lorsque l'on est atteint de la maladie de Parkinson, les neurones dopaminergiques, cellules très énergivores, meurent progressive-

ment. Ceux-là mêmes qui sont responsables de la sécrétion de la dopamine dans la substance noire.

Les neurones qui constituent cette région - dont près de 400.000 neurones dopaminergiques - forment un réseau avec d'autres zones cérébrales. On peut notamment citer le striatum, région particulièrement impliquée dans le contrôle des mouvements, mais aussi dans les fonctions cognitives et comportementales. Ce n'est pas sans rappeler les symptômes de la "maladie de l'énergie" ainsi nommée par le professeur Stephan Chabardès, neurochirurgien au CHU Grenoble Alpes et directeur médical de Clinatec.

Les mitochondries sont les centrales énergétiques de la cellule. Dans la maladie de Parkinson, des altérations dans la fonction mitochondriale réduisent la production d'une molécule, l'ATP (adénosine triphosphate), affectant la survie et le fonctionnement des neurones. La cellule est privée de son carburant.

L'utilisation de lumière infrarouge n'est pas un hasard et repose sur un principe ancestral : la théorie endosymbiotique. Cette dernière explique l'origine des mitochondries comme d'anciennes bactéries devenues des composites indispensables aux cellules eucaryotes pour la production d'énergie.

Au fil du temps, le matériel génétique de la mitochondrie s'est mêlé à l'ADN nucléaire de l'hôte, perdant ainsi son indépendance.

Pour autant, la bactérie n'a pas dit son dernier mot puisqu'elle a conservé des photorécepteurs (molécules sensibles à la lumière) qui peuvent absorber l'infrarouge et en conséquence, renforcer sa production d'ATP et favorisant la réparation cellulaire et la survie neuronale.

*"On voit une amélioration des effets moteurs sans médicaments. Les patients sont moins gênés en termes de rigidité, de raideur, de tremblements, ils n'ont pas besoin de prendre beaucoup de médicaments",* explique Stephan Chabardès. Il ajoute, optimiste : *" lorsqu'on prend une image de leur cerveau pour voir la dopamine, on s'aperçoit qu'elle se maintient, voire qu'elle augmente discrètement la première année. "*

## ***"Je venais de déclencher la maladie, c'était un espoir formidable pour moi"***

Au stade actuel, l'étude clinique débutée en 2021 dite de "preuve de concept" a pour vocation de démontrer la sécurité et la faisabilité du procédé.

L'étude implique sept patients parkinsoniens diagnostiqués depuis moins de deux ans (*De Novo*) auxquels le dispositif est implanté chirurgicalement. Un autre groupe *De Novo* traité uniquement par médicaments est étudié, et cela pendant 4 ans.

Aujourd'hui, 6 patients sur 7 ont été opérés sans le moindre effet secondaire notable.

L'un des patients témoigne : *"Je venais de déclencher la maladie, c'était un espoir formidable pour moi"*. Les patients semblent optimistes sur l'évolution de la pathologie et Stephan Chabardès également : *"On est confiants et on a beaucoup d'espoir concernant notre technologie et l'évolution des patients"*.

## Alzheimer, troubles du sommeil et traumatismes crâniens : les perspectives

D'autres projets se profilent à l'horizon. La photobiomodulation intracrânienne commence tout juste à faire ses preuves quand de nouveaux projets émergent dans l'esprit des chercheurs.

*"La boîte crânienne peut être transparente à certaines longueurs d'ondes, ce qui pourrait nous permettre de traiter la maladie avec un casque bioluminescent"*, précise Jean-Philippe Bourgoin, président du conseil d'administration du Fonds Clinatec et directeur adjoint de la recherche technologique du CEA.

La photobiomodulation transcrânienne offre des angles de recherche sur une variété de troubles : maladie d'Alzheimer, troubles du sommeil et même traumatismes crâniens sur lesquels pas moins de trois essais cliniques sont envisagés pour 2025.



Le projet NIR consiste à envoyer de la lumière, via un implant intracérébral, au plus près des zones du cerveau où se développe la maladie de Parkinson.

par *Lenaig Corderoc'h*

## Entre lumière et implants cérébraux, le laboratoire Clineatéc s'intéresse de près au cerveau

Le centre de recherche biomédicale Clineatéc vise à soigner des pathologies lourdes grâce à des modalités physiques. Connu pour être derrière l'implant cérébral Wimage qui a permis à un paraplégique de marcher, il travaille aussi autour de la lumière pour freiner des maladies comme Parkinson et Alzheimer.

À quelques pas de la gare de Grenoble (Isère), dans un bâtiment de 5810 mètres carrés situé cœur d'une entité du Commissariat à l'énergie atomique (CEA), l'institut Clineatéc dédie toute sa recherche au cerveau. Au rez-de-chaussée, la salle d'analyse du mouvement. C'est ici qu'en 2019 Thibault a démontré le fonctionnement de l'implant cérébral Wimage. Ce tétraplégique est parvenu à marcher et faire bouger ses bras grâce à un immense exosquelette qu'il pilotait par la pensée. L'expérimentation a laissé des traces. L'exosquelette trône dans un coin de la pièce, accroché à un plafond équipé de nombreuses caméras servant à analyser précisément les gestes. Une organisation copiée à l'étranger

En 2023 ce sont les images du Hollandais Gert-Jan contrôlant ses jambes par la pensée qui font le tour du monde, une réussite signée par des chercheurs suisses. Le point commun ? Wimage, l'implant cérébral conçu par les équipes de Clineatéc, un centre de recherche biomédical créé par le CEA avec le CHU et l'université Grenoble Alpes. «Ici nous utilisons des modalités physiques pour traiter des pathologies lourdes du cerveau sans traitement médicamenteux», résume Jean-Philippe Bourgoïn, directeur adjoint de la recherche technologique au CEA. De la technologie utilisée à l'évaluation pré-clinique et jusqu'à l'essai clinique sur l'Homme, toutes les étapes se déroulent dans ce même bâtiment.

Le deuxième étage regroupe les salles où sont fabriqués les dispositifs médicaux. Exosquelette, bras robotisé et fauteuil roulant sont visibles dans ces espaces où la mécanique et l'électronique dominent. Une petite salle blanche permet de fabriquer les composants électroniques comme les implants Wimage. Pour réaliser les analyses biologiques et études pré-cliniques, d'autres salles sont bardées de machines médicales. Dans l'une d'elles, les équipes ont conservé trois cerveaux congelés d'une souris, d'un rat et d'un primate. Au troisième étage une animalerie non visitable regroupe des rongeurs, des primates et des porcs. De quoi tester la biocompatibilité des dispositifs médicaux conçus sur place. Cette organisation, assez unique lorsque le bâtiment est sorti de terre en 2012, a depuis été copiée, comme aux États-Unis avec le labo Shirley Ryan AbilityLab installé dans l'hôpital de Chicago.

L'implant cérébral Wimage conçu à Clinatec. Crédit : P. Avavian  
Aller vers la miniaturisation de l'ordinateur

En mettant au point l'implant Wimage, qui enregistre l'activité électrique cérébrale grâce à ses 64 électrodes, les ingénieurs en électronique du CEA ont réalisé une véritable prouesse ! «L'activité neuronale émet quelques dizaines de microvolts, que les circuits intégrés dans l'implant arrivent à détecter», souffle le responsable du programme cerveau-machine du CEA Guillaume Charvet. Les données collectées sont transmises à un ordinateur pour être traduites en intention de mouvements grâce à des algorithmes d'intelligence artificielle (IA) développés aussi en interne. Le tout en temps réel.

À quelques pas de la salle d'analyse du mouvement, un couloir d'hôpital aseptisé, donnant sur des chambres qui accueillent des patients de jour, débouche sur un bloc opératoire. Pour les visiteurs, cette salle chirurgicale de 90 mètres carrés (le double de celles des hôpitaux traditionnels) ne se découvre qu'à travers la grande vitre de la pièce adjacente. À droite de la table d'opération, l'un des tout premiers robots chirurgicaux Rosa, utilisé pour renforcer la précision des opérations du cerveau. C'est ici que Thibault a subi en 2017 une craniotomie de 5 centimètres, durant laquelle deux morceaux d'os ont été retirés afin de «positionner les deux implants Wimage à la surface du cortex moteur droit et gauche», se souvient Guillaume Charvet.

Si cette première étude clinique visait à démontrer le fonctionnement des implants et leur innocuité, les équipes de Clinatec planchent sur des dispositifs du quotidien. Premier défi : miniaturiser l'ordinateur réalisant les calculs d'IA dans un dispositif accrochable à la ceinture. Elles réfléchissent aussi à «un système de stimulation neuromusculaire à positionner sur le bras pour que le patient attrape des objets», liste Guillaume Charvet. Des mouvements plus complexes à réaliser que la marche puisque le bras se déplace dans un environnement en 3D pour atteindre des cibles. «Le patient doit donc contrôler chaque muscle ! » s'exclame Guillaume Charvet. Une prouesse médicale pour réaliser des gestes du quotidien comme se saisir d'un verre d'eau. Autre projet en cours : transformer l'encombrant casque qui permet aux implants de fonctionner en une casquette équipée d'antennes souples. Un premier exemplaire est déjà visible.

Avec l'implant cérébral Wimage il est possible de contrôler un exosquelette. Crédit : Andrea Aubert Envoyer une lumière infra-rouge

Au-delà des interfaces cerveau-ordinateur, Clinatec mène plusieurs études autour de la lumière. Le neurochirurgien Stephan Chabardès pilote le projet NIR (Near InfraRed), dont l'objectif est de ralentir l'évolution de Parkinson par photobiomodulation intracrânienne. Une maladie qui se traduit dans le cerveau par «une dégénérescence de la substance noire avec perte des neurones à dopamine», rappelle-t-il. Pour freiner cette dernière, les chercheurs envoient

une lumière proche infrarouge au plus près des cellules modales. Une sonde, développée à Clinatéc, est insérée en profondeur du cerveau et positionnée au plus proche de la substance noire. En continu, elle émet pendant huit minutes de la lumière et s'éteint quatre minutes. Quatorze personnes, diagnostiquées depuis moins de deux ans, vont être suivies pendant quatre ans pour la tester.

La piste est aussi envisagée pour prévenir la maladie d'Alzheimer dans le projet Tiroc. Dans un premier temps, les effets de la lumière proche infrarouge appliquée au moyen d'un casque sont étudiés sur des patients sains. Puis, un essai clinique inclura des patients touchés par Alzheimer. Des dizaines de personnes atteintes ou non de troubles neurologiques passent par Clinatéc pour participer à des essais cliniques. L'espace patient est «organisé comme un service hospitalier», selon le docteur Daniel Anglade. Avec une effervescence plus intermittente.

## CLINATEC : ET SI VOUS FINANCIÉZ LA MÉDECINE DE DEMAIN ?

Après 10 ans, le fonds Clinattec lance une nouvelle collecte de 30 millions d'euros d'ici 2030, pour attirer de nouveaux mécènes. Face aux maladies du cerveau en forte progression (Parkinson, Alzheimer, épilepsie, traumatismes crâniens, troubles du sommeil, etc.) et aux handicaps liés aux lésions médullaires (tétraplégie, paraplégie), cette campagne vise à augmenter la capacité de Clinattec à offrir rapidement aux patients des innovations thérapeutiques prometteuses, non médicamenteuses. Ces thérapies utilisent des technologies basées sur les modalités et principes de la physique ainsi que sur l'intelligence artificielle, se concentrant sur la lumière infrarouge, l'électricité, la réfrigération et l'analyse des signaux cérébraux. La présidente pro bono du fonds, Sophie Cluzel, revient sur les succès et dévoile ses objectifs à venir.

3 QUESTIONS À SOPHIE CLUZEL, PRÉSIDENTE PRO BONO DU FONDS CLINATEC ET ANCIENNE MINISTRE DU HANDICAP DE 2017 À 2022.



©Laurence Godart

**QUELLES SONT, SELON VOUS, LES PLUS BELLES RÉUSSITES DE CLINATEC DE CES 10 DERNIÈRES ANNÉES ?**

Clinattec est un centre de recherche unique au monde, associant en un même lieu des ingénieurs du CEA, des cliniciens du CHU Grenoble Alpes, et des chercheurs de l'université Grenoble Alpes et du fonds Clinattec.

Fruit de ses recherches, en 2019, un premier patient tétraplégique a pu remarcher grâce à un implant cérébral contrôlant un exosquelette ; et en 2023, c'est sans exosquelette qu'un patient paraplégique a retrouvé une marche naturelle. Depuis 2021, un essai clinique prometteur évalue un traitement pour stopper la progression de la maladie de Parkinson via la lumière infrarouge amenée au centre du cerveau.

**QUEL EST LE PRINCIPAL OBJECTIF DE CETTE NOUVELLE SOUSCRIPTION ?**

Le potentiel de Clinattec est immense pour détecter, prévenir et traiter les maladies liées au vieillissement, telles que les maladies neurodégénératives et cardiovasculaires. La preuve est faite que son modèle unique de recherche médicale est efficace et prometteur. Il est essentiel aujourd'hui de trouver 30 millions d'euros pour accroître son impact, élargir les pathologies adressées et les essais cliniques, réaliser des dispositifs médicaux performants et faciles à utiliser, et impliquer de nouveaux acteurs. Nous recherchons de nouveaux mécènes et philanthropes pour rejoindre nos partenaires historiques, tels que Covéa, KLESIA, Carcept Prev, Malakoff Humanis, AG2R La Mondiale, Agrica, Crédit Agricole, etc.

**COMMENT CONVAINCRE CES NOUVEAUX MÉCÈNES ?**

Pour ces entreprises, c'est une opportunité inédite d'associer leur image à celle d'un acteur scientifique d'excellence, de s'investir dans le domaine de la santé et du vieillissement qui nous concerne tous, et de permettre à leurs collaborateurs d'adhérer à ces valeurs, dans le cadre de leur démarche RSE. Enfin, rappelons que 60% de leur don est déductible des impôts sur les sociétés dans la limite de 20 000 euros ou 0,5% du chiffre d'affaires, et qu'en cas de dépassement du plafond, il est même possible de reporter l'excédent sur les 5 exercices suivants.

Pour en savoir plus sur nos projets : [www.fonds-clinattec.fr](http://www.fonds-clinattec.fr) et devenir mécène : [contact@fonds-clinattec.fr](mailto:contact@fonds-clinattec.fr)

### CLINATEC EN 10 ANS

- 2012 : création à Grenoble du centre de recherche biomédicale Clinattec - Edmond J. Safra par Jean Therme, directeur du CEA Grenoble, et le Professeur Alim-Louis Benabid, neurochirurgien, docteur en physique, PU-PH au CHU Grenoble Alpes.
- 2014 : création du Fonds de dotation Clinattec, avec Alain Mérieux à sa présidence.
- 2019 : le premier patient tétraplégique équipé d'un exosquelette parvient à se mouvoir, grâce à un implant cérébral inédit.
- 2021 : démarrage de l'essai clinique « NIR Parkinson » visant à traiter la maladie de Parkinson par la lumière infrarouge.
- 2023 : l'implant cérébral développé à Clinattec, permet à une personne paraplégique de contrôler sa marche par la pensée, sans exosquelette.
- 2024 : 8 essais cliniques en cours.

Recherchez une fiche santé, un article...



## L'homme qui pilote internet par la pensée: un implant cérébral entre exploit et effet d'annonce

Par Soline Roy

Le Figaro numérique, publié le 21/09/2024 à 12:00



Atteint de sclérose latérale amyotrophique, Mark est l'un des patients américains ayant reçu l'implant cérébral Stentrode qui lui permet de piloter par la pensée un assistant personnel. *Synchron*

**Un implant cérébral installé sans opération intracrânienne a permis à un patient d'utiliser des interfaces informatiques sans voix ni geste, simplement par l'activité neuronale.**

Scroller. Cliquer. Faire glisser. Étirer ou pincer. Autant de gestes que nous réalisons au quotidien sur nos ordinateurs et smartphone, mais qui étaient interdits à Mark, 64 ans, à cause d'une paralysie des bras et des mains. Mais grâce à un implant cérébral d'un nouveau genre, il a pu, simplement par la pensée, surfer sur internet ou

envoyer des e-mails. Puis piloter l'assistant personnel Alexa d'Amazon, s'aider de ChatGPT pour échanger avec un interlocuteur (l'intelligence artificielle étant chargée de lui suggérer des réponses appropriées parmi lesquels il devait choisir) ou utiliser le casque de réalité virtuelle Apple Vision Pro. Toutes ces tâches ont été rendues possibles par un implant de la société américaine Synchron, dans laquelle Jeff Bezos et Bill Gates, fondateurs respectifs d'Amazon et de Microsoft, ont investi 75 millions de dollars. La start-up se place comme un concurrent direct de Neuralink, la société d'implants neuronaux d'Elon Musk.

Cela n'a l'air de rien, mais c'est un peu de liberté retrouvée pour cet habitant de Pennsylvanie atteint d'une sclérose latérale amyotrophique (SLA). Aussi appelée maladie de Charcot, elle est due à une dégénérescence des motoneurones, les cellules qui commandent la contraction des muscles, et entraîne une paralysie musculaire progressive. Contraint de recourir à une aide extérieure pour tous les gestes de la vie quotidienne, l'homme peut désormais en toute indépendance allumer la lumière, passer des appels vidéo ou envoyer des SMS, diffuser de la musique ou des programmes télévisés, contrôler des appareils domestiques intelligents, lire des livres sur une tablette de lecture ou faire des achats en ligne. Et tout cela sans utiliser sa voix, donc à l'abri des indiscretions de son entourage. « *Cela me redonne l'indépendance que je suis en train de perdre* », s'est-il réjoui dans un communiqué. Et ce, grâce à un implant cérébral d'un genre unique : il est niché dans un vaisseau sanguin cérébral et implanté par voie endovasculaire. L'opération est bien moins invasive que celle nécessaire pour ses concurrents posés dans ou sur le cortex.

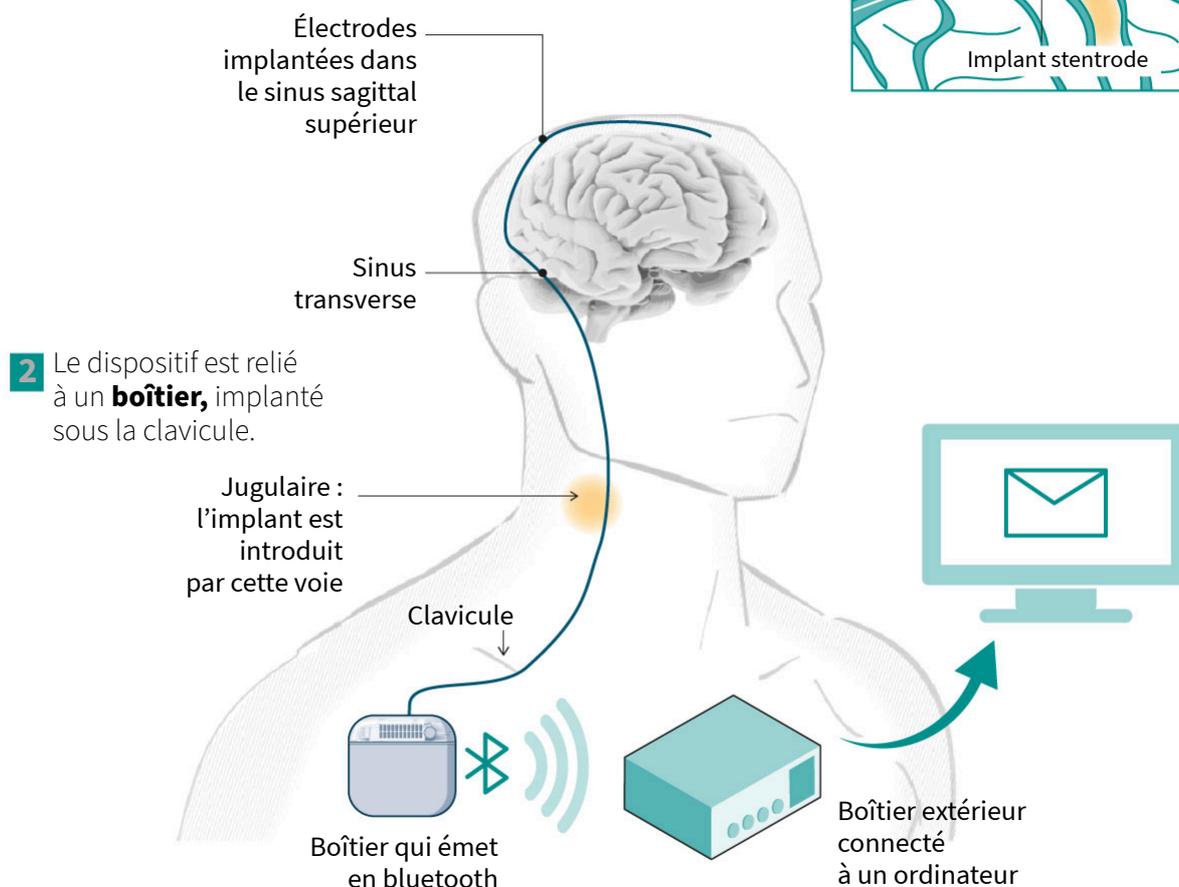
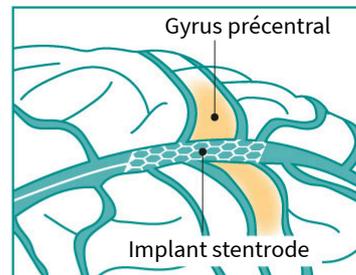
## 16 électrodes de 0,3 mm<sup>2</sup>

Mark est, depuis un an, l'un des dix patients utilisant cette interface cerveau-machine développée par la société américaine Synchron. En janvier 2023, une publication dans *Jama Neurology* détaillait l'implantation de quatre premiers patients à Melbourne, en Australie. L'implant nommé Stentrode est un maillage de 16 électrodes en platines de 0,3 mm<sup>2</sup> chacune. Il est introduit par la veine jugulaire pour atteindre le sinus sagittal supérieur, un vaisseau sanguin situé juste sous la dure-mère, la membrane qui enveloppe le cortex. Un simple «stent» cérébral, en somme. Une sonde d'un diamètre de 1,3 mm relie les électrodes à un boîtier implanté sous la peau en dessous de la clavicule, qui renvoie les signaux neuronaux enregistrés par les électrodes à un dispositif externe. Celui-ci trie et traduit les signaux pour le dispositif final piloté par le patient (ordinateur, tablette...). À l'interface cerveau-machine a d'abord été ajouté un dispositif enregistrant les mouvements oculaires des patients,

qui déplaçaient ainsi le curseur sur l'écran avant de « cliquer » par la pensée à l'endroit sélectionné. L'un des patients a réussi, au bout de 4 séances d'entraînement, à s'affranchir du suivi oculaire pour opérer une sélection parmi cinq choix possibles. Un essai clinique plus large est désormais envisagé par Synchron, qui espère pouvoir implanter une centaine de patients.

## Un implant cérébral sans ouvrir le crâne

**1** Les **implants** faisant le lien entre le cerveau et l'ordinateur nécessitent généralement une **craniotomie** pour introduire des électrodes dans le cerveau. Ce système est **moins invasif** puisqu'il est implanté dans un **vaisseau sanguin cérébral**.



**3** Grâce à une **connexion sans fil**, le dispositif transmet **le signal du cerveau à un boîtier** externe qui décode les informations. Les patients ont pu par la pensée envoyer des SMS, des e-mails, effectuer des achats en ligne, et utiliser des appareils connectés...

Source : Jama Network



« *La technique, par voie vasculaire, est séduisante* », concède Jérémie Mattout, chercheur Inserm au Centre de recherches en neurosciences de Lyon. Elle implique en effet une chirurgie moins lourde que pour les implants corticaux, qui imposent d'ouvrir le crâne voire de pénétrer à l'intérieur du cortex. Elle n'est cependant pas anodine : les patients australiens ont passé près de 4 heures au bloc (tests du dispositif inclus). Ils ont pu rentrer chez eux après 2 ou 3 jours d'hospitalisation et

aucun effet indésirable grave n'a été relevé, les patients n'ayant rapporté que quelques maux de tête. À 3 et 12 mois, aucune occlusion du vaisseau abritant l'implant, et aucune migration de celui-ci n'a été constatée. Les patients ont cependant dû prendre « *une double thérapie antiplaquettaire pendant 3 mois et de l'aspirine pendant au moins 1 an* », indiquent les auteurs. « *Il y a un risque de thrombose créé par le stent lui-même* », explique Guillaume Charvet, chef du service de recherche biomédicale en neurotechnologies au CEA - Clinatec, un laboratoire grenoblois ayant développé un implant de mesure de l'activité cérébrale (Wimagine).



## **On s'interroge sur le rapport bénéfice/risque pour ces patients. Le risque est certes réduit, mais pour l'instant le bénéfice n'est pas énorme.**

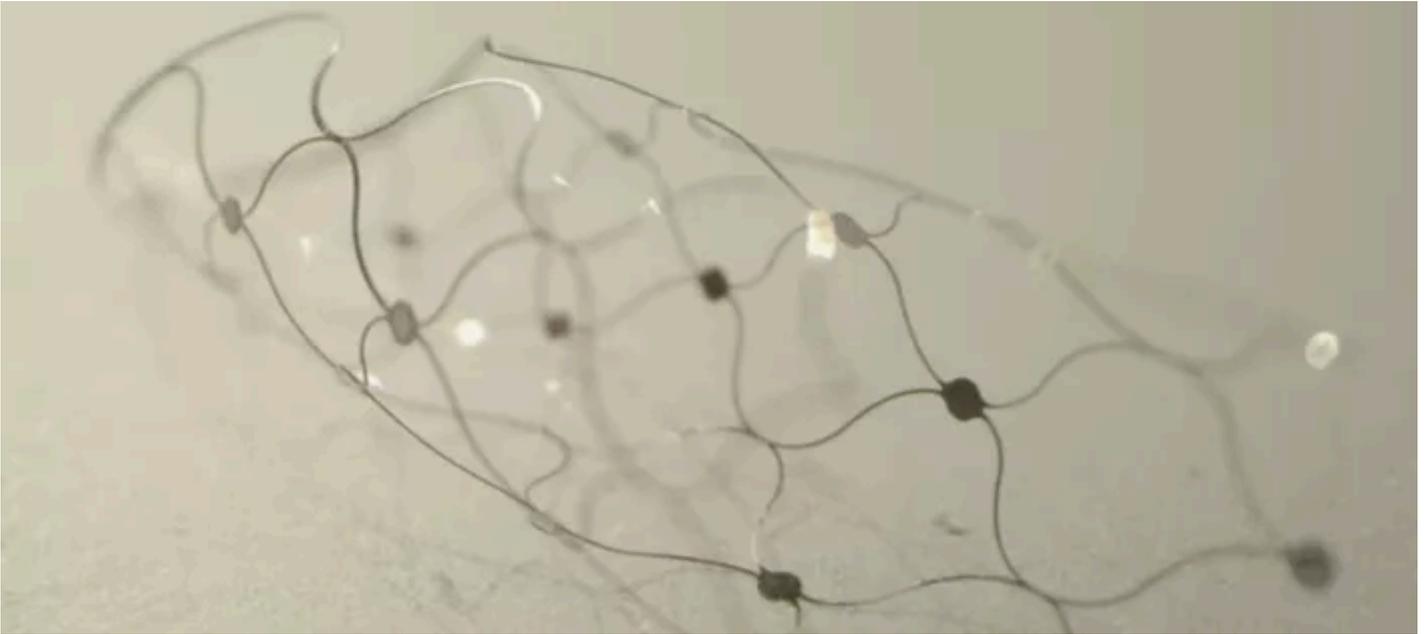
Jérémie Mattout, chercheur Inserm au Centre de recherches en neurosciences de Lyon

La simplicité du dispositif a un autre coût : sa performance. « *D'abord, elle est contrainte par le système vasculaire : on positionne les électrodes là où le vaisseau passe, et donc pas forcément près des zones que l'on peut vouloir atteindre*, note Jérémie Mattout. *Cela conditionne les informations neuronales que l'on reçoit.* » Implanter des électrodes directement sur ou dans le cortex, cela permet de les positionner précisément dans les régions dont l'on cherche à décoder le signal (selon que l'on veut faire marcher les patients, leur permettre de piloter un exosquelette ou une prothèse, décoder leur langage...).

Grégoire Courtine, neuroscientifique à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne qui en associant l'implant de Clinatec à un implant de stimulation médullaire a permis à des patients paraplégiques de remarcher, souligne cependant un avantage potentiel de la technique : l'implant étant situé dans un vaisseau sanguin, « *le signal pourrait être plus stable et l'implant avoir une longévité plus longue* ». Les électrodes positionnées à l'intérieur du cortex finissent en effet par être « encapsulées » par des cellules gliales pour défendre les tissus cérébraux, au risque de limiter la longévité du système.

L'implant Stentrode ne compte en revanche que 16 électrodes là où d'autres en offrent bien davantage. Soixante-quatre pour Wimagine. Quant au dispositif de Neuralink, il en compte... plus de 1000 ! « *Plus vous avez d'électrodes, meilleure sera*

*la résolution de mesure, explique Guillaume Charvet. Mais cela ne sert à rien si elles sont trop proches. Par exemple, on estime que quand elles sont placées à la surface du cortex, en dessous de 2 mm d'écart entre deux électrodes elles mesureront la même chose. »*



L'implant Stentrode développé par la société américaine Synchron est un maillage de 16 électrodes. *Synchron*

Autre limite soulignée par les experts : le nombre de « degrés de liberté » offerts par l'implant de Synchron. Un degré de liberté c'est, de façon simplifiée, le nombre d'opérations mentales réalisables . *« Permettre un simple switch oui/non, c'est un seul degré de liberté, explique Jérémie Mattout. Mais les choses se complexifient si vous voulez par exemple commander un bras robotisé, qui va dans plusieurs directions, peut effectuer des rotations, etc. »* Les chercheurs de Clnatec ont ainsi montré qu'avec leur implant, les patients tétraplégiques pouvaient contrôler les membres supérieurs d'un exosquelette en 8 dimensions, et les patients paraplégiques implantés à Lausanne ont 6 degrés de liberté dans le mouvement de leurs jambes. Dans la publication de 2023, Stentrode n'offrait qu'un degré de liberté : par la pensée, Mark peut allumer ou éteindre la lumière, mais il ne peut pas en moduler l'intensité. Or pour faire cela, pas besoin de chirurgie, précise Jérémie Mattout : des électrodes posées sur le crâne suffisent. *« On s'interroge donc sur le rapport bénéfice/risque pour ces patients. Le risque est certes réduit, mais pour l'instant le bénéfice n'est pas énorme. Les chercheurs de Synchron ont l'air de penser qu'ils pourront aller vers plus de degrés de liberté, mais ils ne l'ont pas vraiment mis en pratique. »*



**C'est difficile d'avoir des informations précises de cette compagnie. J'ai rencontré le patron de l'entreprise et essayé d'obtenir des détails sur la qualité des signaux enregistrés, mais sans succès. Synchron, jusqu'à maintenant, est une promesse qui est difficile à suivre.**

Grégoire Courtine, neuroscientifique à l'école Polytechnique de Lausanne

Les chercheurs de Synchron amélioreront-ils leur dispositif ? « *C'est difficile d'avoir des informations précises de cette compagnie, regrette Grégoire Courtine. J'ai rencontré le patron de l'entreprise et essayé d'obtenir des détails sur la qualité des signaux enregistrés, mais sans succès. Synchron, jusqu'à maintenant, est une promesse qui est difficile à suivre.* » Guillaume Charvet précise qu'au-delà des possibilités offertes par l'implant lui-même, le patient a son mot à dire : beaucoup dépend de « *sa capacité à réaliser des tâches mentales suffisamment précises et distinctes, et cela s'apprend, comme un sportif qui à force de réaliser un mouvement N fois va le faire de plus en plus facilement. Au fil de l'utilisation du dispositif, les neurones se réorganisent grâce au phénomène de plasticité cérébrale. Par ailleurs les algorithmes sont mis à jour pour offrir un décodage de plus en plus précis.* »

## Questions éthiques

Sans compter les risques inhérents à toute chirurgie, a fortiori quand elle touche le cerveau, ce genre d'implant va-t-il se démocratiser ? « *Je comprends la crainte de "l'homme augmenté"* », glisse Grégory Demazeau, responsable R&D chez Expleo, société spécialisée en ingénierie et technologie qui par son mécénat de compétences auprès du Fonds Clinattec accompagne le laboratoire dans le développement électronique et logiciel de son interface cerveau-machine. *Mais à ce jour, tous les laboratoires qui travaillent sur ces technologies implantent des patients atteints de pathologies très sévères, et non des personnes en pleine santé. Ce sera le rôle des autorités sanitaires de veiller à ce que ça en reste là.* »

**La rédaction vous conseille**

- **Un implant cérébral pour réparer les dégâts cérébraux d'un traumatisme crânien**
- **Neuralink: qu'est-ce que l'implant cérébral d'Elon Musk reçu par un premier être humain ?**
- **L'implant cérébral d'Elon Musk, entre espoir et fantasme**

## Sujets

