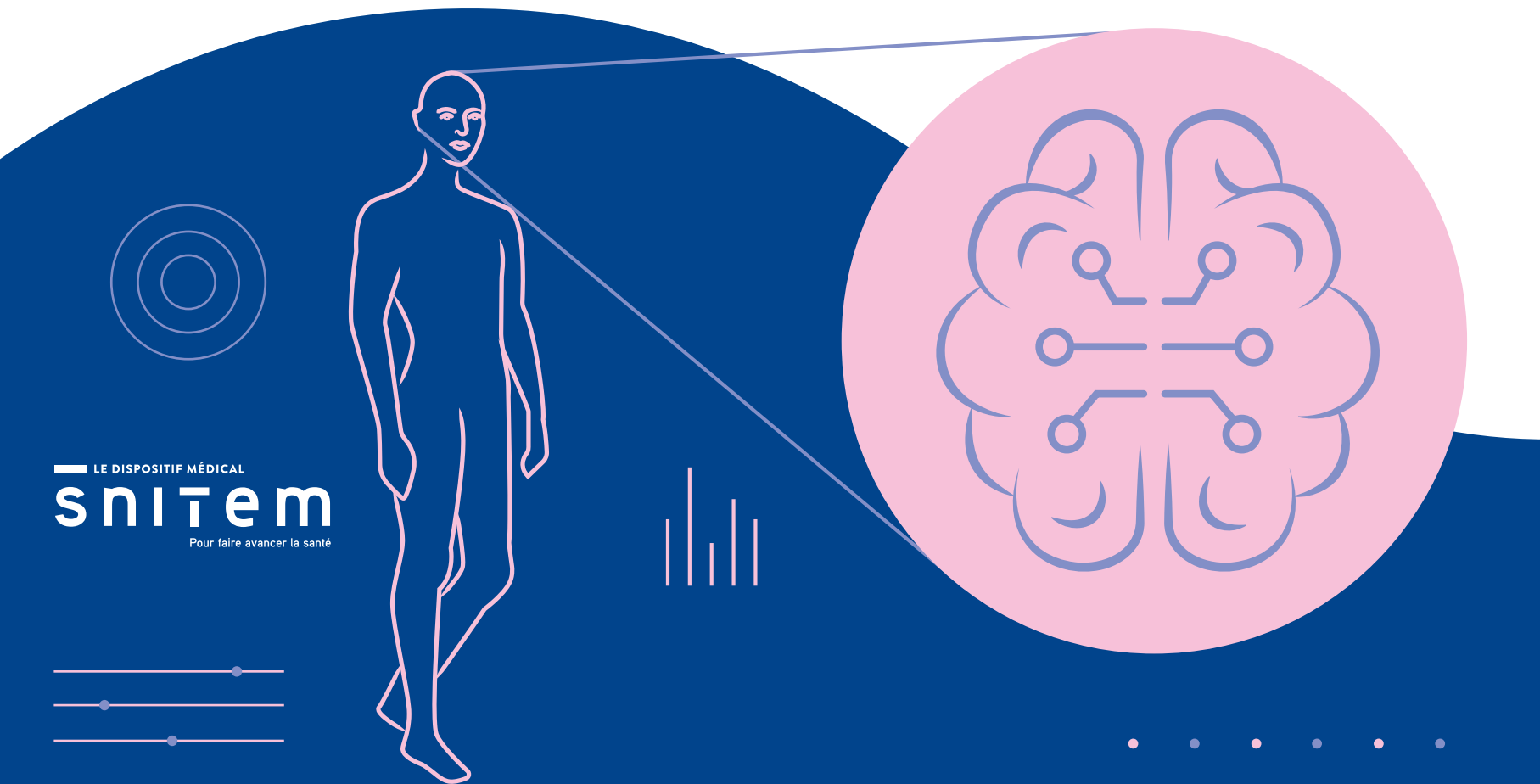


Progrès
& dispositifs
médicaux

AVRIL 2026

INNOVATION EN NEUROLOGIE



LE DISPOSITIF MÉDICAL
snitem
Pour faire avancer la santé



SOMMAIRE

— LE DISPOSITIF MÉDICAL

snitem

Pour faire avancer la santé

Maison de la Mécanique
39, rue Louis Blanc
CS 30080
92038 La Défense Cedex

Directeur de la publication: François Hébert
Responsable d'édition: Natalie Allard
Rédactrices: Camille Grelle, Nathalie Ratel
Édition déléguée: Presse Infos Plus
(www.presse-infosplus.fr)
SR et édition: Studio Hartpon (Caroline Perreau)
Création graphique: ArtFeelsGood
Maquette: Marjorie Gosset
Crédits photos, tous droits réservés:
Adobe Stock (certaines images ont été créées à l'aide d'outils
d'IA générative), Abbott, Boston Scientific, Medtronic
France, Siemens Healthineers, Stryker France, Terumo
Publication: Avril 2026
ISBN: 979-10-93681-36-8

Les mots techniques ou scientifiques expliqués
en fin de livret dans la partie glossaire sont signalés
dans le texte par le symbole **G**

2	PRÉFACE	32	STENTS D'une technique adjuvante à un dispositif incontournable	59	NEUROMODULATION DES RACINES SACRÉES De la « neuro » à l'urologie et la gastroentérologie
4	INFOGRAPHIE				
6	INTRODUCTION				
10	DIAGNOSTIC - CONTEXTE En quête d'un diagnostic toujours plus précis, rapide et personnalisé	34	FLAWS ET DM INTRASACCULAIRES Pour une approche de plus en plus personnalisée	60	STIMULATION DU NERF VAGUE Une stimulation du cerveau... indirecte
11	NEURO-IMAGERIE Voir toujours plus, toujours mieux	37	THROMBECTOMIE MÉCANIQUE Une innovation de rupture pour l'AVC ischémique	64	STIMULATION CÉRÉBRALE PROFONDE Une épopée française
16	ÉLECTROENCÉPHALOGRAMME Explorer pour mieux diagnostiquer	41	HÉMATOME SOUS DURAL CHRONIQUE Traiter une pathologie de plus en plus fréquente	70	RTMS Traiter la dépression et la douleur chronique
18	ÉLECTRONEUROMYOGRAPHIE Activité électrique du système nerveux périphériques: au-delà de l'examen clinique	42	SALLES HYBRIDES ET ROBOTIQUE Des dispositifs et des procédures toujours moins invasifs	75	NEUROSTIMULATION À DISTANCE Premiers pas vers la « télé-neurologie »
21	MATIÈRE BLANCHE Mesurer les lésions de la matière blanche	46	PERSPECTIVES Intelligence artificielle: un immense champ des possibles	77	PERSPECTIVES La neurologie à l'ère de la télémédecine
10	NEURORADIOLOGIE INTERVENTIONNELLE - CONTEXTE L'imagerie comme arme thérapeutique	47	NEUROSTIMULATION - CONTEXTE Comprendre la neurostimulation	79	TÉMOIGNAGE PATIENT
27	EMBOLISATION L'embolisation, alternative à la chirurgie ouverte	48	INTRODUCTION La neurostimulation ou le « pouvoir » électrique et magnétique	80	GLOSSAIRE
30	COILS Coils: une technique fiable et sûre contre les anévrismes	53	STIMULATION MÉDULLAIRE À l'assaut de la moelle	82	SOURCES
				84	REMERCIEMENTS

Ensemble, cliniciens, chercheurs et industriels contribuent à faire évoluer les pratiques au bénéfice des patients.

PRÉFACE



Pr Jean-Pierre Pruvo

*Professeur des universités, CHU de Lille,
Président de la Société française de
neuroradiologie, Past Président de la Société
française de radiologie*

L'innovation en neurologie s'inscrit aujourd'hui dans une dynamique remarquable, portée en grande partie par les progrès des dispositifs médicaux. À travers cet ouvrage, le lecteur pourra mesurer à quel point ces avancées transforment en profondeur notre approche du diagnostic, de la prise en charge et du suivi des patients.

Parmi les révolutions les plus marquantes, l'imagerie par résonance magnétique occupe

une place centrale. L'essor des IRM à haut et très haut champ (3 et 7 Tesla) a profondément modifié notre capacité à caractériser les pathologies neurologiques. La finesse de résolution désormais atteinte permet d'identifier des anomalies jusqu'alors invisibles, comme certaines dysplasies neuronales dans les épilepsies réfractaires au traitement. Au-delà du diagnostic, ces outils ouvrent la voie à une médecine de précision, plus personnalisée : identification de nouveaux biomarqueurs, stratification thérapeutique, évaluation pronostique et émergence de facteurs prédictifs, notamment dans les pathologies neurologiques et psychiatriques les plus complexes.

Dans le même temps, les perspectives offertes par l'IRM à bas champ, potentiellement utilisable au lit du patient, constituent un espoir majeur pour les situations critiques. Chez les patients en réanimation, pour lesquels le déplacement vers un plateau technique lourd représente un risque non négligeable, ces dispositifs pourraient permettre un accès plus rapide et plus sûr à une imagerie cérébrale pertinente. Il est essentiel de soutenir ces développements, qui répondent à un besoin clinique réel.

Sur le plan thérapeutique, les dispositifs médicaux ont également connu des avancées spectaculaires. La thrombectomie mécanique en est une illustration emblématique. Grâce à l'ingéniosité des industriels, les cathéters, guides, systèmes d'aspiration et stents retrievers ont été considérablement améliorés, rendant possible une revascularisation rapide et efficace dans l'AVC. Ces innovations ont transformé le pronostic de nombreux patients et constituent un exemple réussi de collaboration entre recherche clinique et développement technologique.

Dans la prise en charge des anévrismes intracrâniens, les progrès sont tout aussi notables. Les dispositifs actuels, qu'il s'agisse de coils ou d'endoprothèses, s'adaptent de plus en plus finement à l'anatomie des lésions, tout en garantissant une intégration durable dans la paroi vasculaire. Cette exigence de biocompatibilité et de sécurité à long terme est essentielle, notamment chez des patients jeunes.

Ainsi, cet ouvrage met en lumière une réalité essentielle : l'innovation en neurologie repose sur un dialogue constant entre cliniciens, chercheurs et industriels. Ensemble, ils contribuent à faire évoluer les pratiques au bénéfice des patients, en repoussant sans cesse les limites du possible.

En une génération, la neurologie est passée d'une discipline descriptive à une médecine d'action, de précision et de réparation.

PRÉFACE



Dr Denis Dupoirion

Anesthésiste à l'Institut de cancérologie de l'Ouest – site Paul Papin, prix Axel Kahn de la Ligue contre le cancer pour ses travaux sur l'analgésie intrathécale

Ce livret offre une vision à la fois accessible et remarquablement complète des évolutions récentes de la neurologie, s'inscrivant dans une perspective historique que j'ai moi-même eu la chance de traverser.

Lorsque j'ai débuté mes études, la neurologie occupait une place à part au sein du paysage médical. Les neurologues étaient considérés comme les maîtres d'une discipline fondée sur

une connaissance clinique exceptionnelle, capables de localiser avec précision une lésion à partir des seuls symptômes. Mais cette excellence diagnostique se heurtait à une limite majeure : l'absence quasi totale de moyens thérapeutiques. Il n'y avait alors ni imagerie, ni traitement. Le diagnostic était une fin en soi.

L'arrivée du scanner dans les années 1980, puis par la suite celle de l'IRM, ont marqué un premier tournant décisif. L'imagerie a totalement transformé notre capacité à voir, comprendre et confirmer. Paradoxalement, elle a aussi, un temps, contribué à redéfinir la place du neurologue, en déplaçant une partie de son expertise vers la technologie. Mais ce n'était là que le prélude d'une transformation à venir bien plus profonde.

Depuis une trentaine d'années, la neurologie a connu une véritable révolution, portée par l'essor des dispositifs médicaux, des techniques interventionnelles et d'une compréhension toujours plus fine des mécanismes physiopathologiques. Le champ neurovasculaire en est une illustration frappante : des accidents vasculaires cérébraux (AVC) autrefois lourdement handicapants peuvent aujourd'hui, lorsqu'ils sont pris en charge rapidement,

connaître des récupérations spectaculaires grâce à des protocoles et des interventions hautement spécialisés.

Dans le même temps, les avancées en neurostimulation – qu'elle soit cérébrale profonde, médullaire ou périphérique – ont profondément modifié la prise en charge de pathologies comme la maladie de Parkinson, la douleur chronique ou la spasticité. La chirurgie fonctionnelle, de plus en plus précise et parfois réalisée chez des patients conscients, ouvre des perspectives inédites. À cela s'ajoutent des progrès constants en imagerie, en analyse du signal nerveux et, désormais, l'apport de l'intelligence artificielle.

Ce livret rend compte, avec justesse, de cette dynamique exceptionnelle. Il montre comment, en une génération, la neurologie est passée d'une discipline essentiellement descriptive à une médecine d'action, de précision et, de plus en plus, de réparation. Cette transformation bénéficie à la fois aux patients, grâce à des diagnostics plus précoces et des traitements plus efficaces, et aux professionnels de santé, dont les pratiques ont été profondément renouvelées.

LE CERVEAU, MODE D'EMPLOI

Le cerveau est un organe à la fois complexe, mystérieux et fascinant. Composé à 75% d'eau et ne pesant qu'environ 1,3 kilo, il est pourtant le véritable chef d'orchestre du corps humain. En effet, c'est lui qui reçoit, traite et renvoie les informations aux membres et aux autres organes. Avec la moelle épinière, le cerveau constitue le système nerveux central.

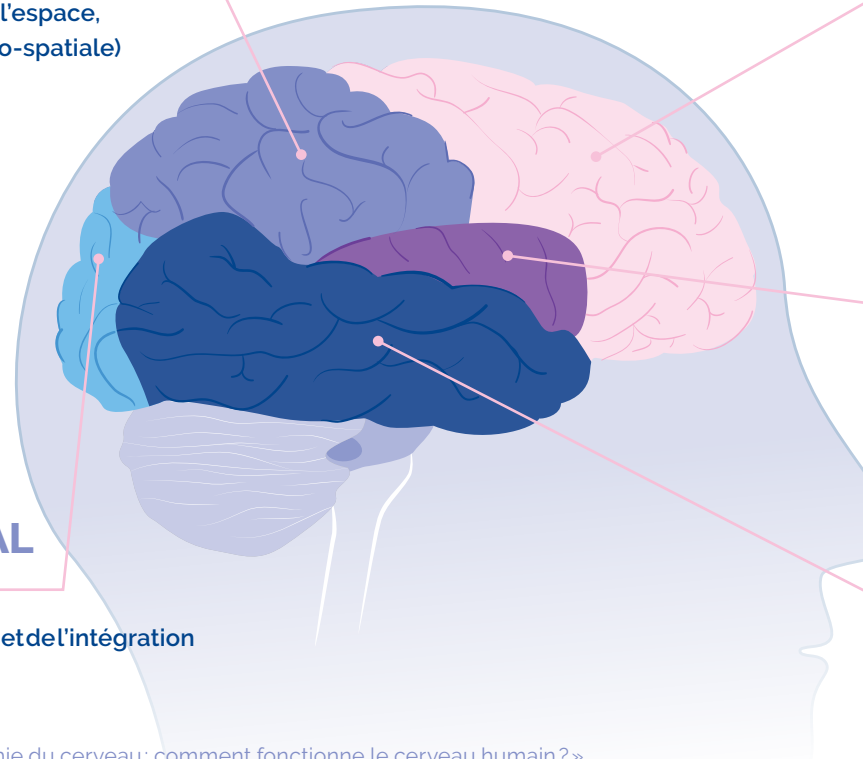
Le cerveau compte deux hémisphères, le gauche et le droit, qui contrôlent chacun la partie opposée du corps. Il est composé de deux tissus : la substance grise – qui regroupe les neurones et est responsable du traitement de l'information – et la substance blanche – qui regroupe les axones (cellules nerveuses) en charge de la transmission de cette information entre les neurones.

LOBE PARIÉTAL

Zone de la conscience du corps
(repérage dans l'espace,
perception visuo-spatiale)

LOBE OCCIPITAL

Zone de la vision et de l'intégration
des messages



Sources : « Anatomie du cerveau : comment fonctionne le cerveau humain ? », Institut du cerveau ; « L'essentiel sur le cerveau », CEA.

Chaque hémisphère est divisé en cinq régions, chacune étant spécialisée dans une fonction précise.

LOBE FRONTAL

Zone de la parole, du langage, du raisonnement et du mouvement des membres

CORTEX INSULAIRE (OU INSULA)

Zone de la perception et de la conscience de soi, des émotions, de la douleur, des odeurs

LOBE TEMPORAL

Zone de l'audition, de la mémoire et de l'émotivité

ZOOM SUR LES PRINCIPALES PATHOLOGIES NEUROLOGIQUES

Maladie d'Alzheimer et apparentées

• **Définition**: maladie neurodégénérative ^g qui affecte les fonctions cognitives (mémoire, langage, raisonnement, apprentissage...).

• **Diagnostic**: consultation neurologique clinique (entretien, recueil de la plainte), examen neuropsychologique et neurologique.

1,3 million de Français atteints de maladies neurodégénératives

35% seulement des malades seraient diagnostiqués

Source: Fondation Recherche Alzheimer, 2024.

Épilepsie

• **Définition**: affection du cerveau définie par la survenue d'au moins une crise non provoquée et la présence d'un facteur de prédisposition à l'épilepsie.

• **Diagnostic**: examen d'imagerie (scanner ou IRM), mesure de l'activité électrique du cerveau (EEG).

≈ 700 000 personnes épileptiques traitées en France

Source: Santé publique France, 2024.

Accident vasculaire cérébral

• **Définition**: événement aigu le plus souvent dû à l'oblitération d'une artère (entraînant un accident ischémique cérébral) ou, plus rarement, à la rupture d'un vaisseau (entraînant un accident hémorragique cérébral).

• **Diagnostic**: en cas de suspicion, confirmation par un scanner ou une IRM pour déterminer l'origine de l'AVC (artère bouchée ou rompue), examens

complémentaires (prises de sang, ECG, échographie des vaisseaux du cou ou du cœur).

≈ 120 000 personnes hospitalisées pour AVC chaque année en France

+ 30 000 en décèdent

Source: Direction générale de la Santé, 2024.

Maladie de Parkinson

• **Définition**: maladie neurodégénérative ^g progressive, caractérisée par la destruction de certains neurones fabriquant la dopamine indispensable au contrôle des mouvements et l'accumulation d'amas protéiques toxiques pour les cellules nerveuses.

• **Diagnostic**: consultation neurologique clinique pour établir un faisceau d'arguments. Une IRM peut être réalisée pour éliminer toute autre affection neurologique.

275 500 malades de Parkinson en France

25 000 nouveaux cas chaque année

Source: Ministère de la Santé, 2024.

Sclérose en plaques

• **Définition**: maladie auto-immune du système nerveux central.

• **Diagnostic**: examen clinique, IRM, données biologiques (analyses sanguines et du liquide céphalo-rachidien).

120 000 personnes touchées par la SEP en France

700 sont des enfants

Source: Ministère de la Santé, 2024.

INTRODUCTION

NEUROLOGIE, OU LA FABULEUSE CONQUÊTE DES MYSTÈRES DU CERVEAU

Le poids que représente le cerveau dans le corps (2%) est inversement proportionnel à son rôle. Les centaines de milliards de neurones qui le composent font de lui le siège de l'activité intellectuelle et sensitive. Un immense champ des possibles qui fait de la neurologie une discipline, non seulement en constante évolution, mais également des plus fécondes.



Comparativement à la plupart des autres spécialités médicales, la neurologie moderne est une discipline récente, fruit d'une scission avec la psychiatrie dans les années 1850. Dès lors, ce sont les neurologues qui prennent en charge les maladies causées par les lésions du système nerveux, les psychiatres s'occupant pour leur part des dérèglements du comportement et des névroses. Puis, à l'aube du XX^e siècle, une technique apparaît qui révolutionne la clinique des maladies mentales : la neurochirurgie. En France, c'est le médecin Joseph Babinski qui ouvre la voie à la chirurgie du cerveau.

Diagnostic : l'imagerie au fondement de tout

Pour autant, il s'agit encore de comprendre et de localiser les lésions du système nerveux sans voir – uniquement à partir de l'observation clinique. C'est l'imagerie qui permet de montrer ce qui était jusqu'ici invisible. Les techniques d'imagerie cérébrale se développent après la Seconde Guerre mondiale, permettant d'avoir progressivement accès à l'anatomie du cerveau et de mieux comprendre le fonctionnement des régions cérébrales responsables

des activités motrices, sensorielles ou cognitives. Le scanner, puis l'IRM et la tomographie par émission de positons (TEP), révolutionnent le diagnostic en neurologie dans les années 1970. Celui-ci devient toujours plus précis, rapide et personnalisé. Depuis, grâce aux innovations technologiques et à l'intelligence artificielle, l'imagerie est devenue à la fois un outil de mesure, d'aide au diagnostic, voire de prédiction thérapeutique. L'imagerie connectée ouvre également la voie à la téléneurologie (*voir ci-après*).

Étudier l'activité du cerveau

Mais le diagnostic neurologique repose également sur l'enregistrement de l'activité électrique cérébrale. À la fin du XVIII^e siècle, les bases de l'existence d'une activité électrique dans les nerfs et les muscles des animaux sont posées – une théorie qui donnera naissance à l'électrophysiologie en 1843. En 1875, l'électroencéphalogramme (EEG) est inventé, avant d'entrer dans la pratique courante au cours des années 1950, en particulier pour le diagnostic de l'épilepsie. L'informatique, puis le numérique dans les années 1980-90, révolutionnent l'électroneuromyographie (ENMG), permettant notamment d'examiner bien plus que les seuls nerfs. Puis la SEEG, qui consiste à implanter des électrodes dans le cerveau au lieu de les déposer à la surface du cortex, est utilisée dès le début des années 2000. Enfin, depuis quelques années, la mesure de la matière blanche est en cours de déploiement. Elle offre de belles opportunités pour la prédiction de sortie de coma et pour certaines

pathologies neurologiques, en termes de diagnostic, de vérification d'hypothèses et de suivi de l'évolution.

D'une spécialité à une hyperspécialisation des professionnels

Parallèlement, une évolution organisationnelle a considérablement modernisé la discipline. En effet, au début des années 1990, la neurologie devient hétérogène et constituée d'hyper-spécialistes. Des études ont d'ailleurs montré que les patients suivis par des professionnels formés s'occupant d'une seule pathologie étaient mieux pris en charge, et plus rapidement, car les filières s'organisent de manière plus efficiente, avec les Samu, les radiologues, les urgentistes. L'hyperspécialisation a permis d'améliorer le pronostic vital et fonctionnel des patients et de développer la recherche. L'avènement de la neuroradiologie interventionnelle et des dispositifs médicaux implantables constitue une autre étape majeure, permettant de traiter en plus les anévrismes et les malformations des vaisseaux.

La révolution de la neuro-radiologie interventionnelle

La neuroradiologie interventionnelle combine l'utilisation des systèmes d'imagerie avec différents dispositifs médicaux – non seulement pour diagnostiquer mais également pour traiter. En offrant une alternative à la neurochirurgie qui >>>

Le cerveau, objet de fascination dès l'Antiquité

Les médecins de l'Égypte ancienne ont été les premiers à décrire le cerveau, le liquide céphalorachidien dans lequel il baigne ainsi que les méninges qui l'enveloppent. Ils ont aussi été les premiers à réaliser des trépanations. Dans le papyrus Edwin Smith, véritable traité de traumatologie datant de 1550 av. J.-C., les méninges sont comparées aux plissements se formant à la surface du cuivre fondu. Ils furent aussi les premiers à faire le lien entre certaines atteintes neurologiques et des blessures ou lésions de la tête et du cou, comme les troubles de la marche, la raideur de la nuque, la déviation des yeux ou encore les maux de tête et l'hémiplégie traumatique. Pourtant, cet organe méconnu – les Égyptiens attribuaient en effet au cœur la direction de l'ensemble du corps humain – était peu considéré... au point d'être extrait du crâne du défunt lors de la momification, sans en assurer la conservation contrairement aux autres organes.

1875

Invention de l'électroencéphalogramme (EEG)

1890

Apparition de l'électromyographie

Années
1930

Début de la neurochirurgie

Années
1970

Essor de la radiologie interventionnelle

Années
1970-90

Essor de la neurostimulation

Années
1980

IRM anatomique; premiers coils

»» nécessite une ouverture du crâne, cette pratique révolutionne la neurologie. Elle devient d'autant plus rapidement l'un des piliers de la radiologie interventionnelle par voie endovasculaire qu'elle ne cesse de se perfectionner (coils, stents, flows diverters et disruptors, dispositifs intra-sacculaires, thrombectomie mécanique...), offrant une grande adaptabilité selon la pathologie et le profil du patient, mais également selon les préférences et habitudes du praticien. Depuis les années 2000, les techniques interventionnelles se sont énormément développées en France tout comme les indications de cette spécialité à la croisée des chemins.

Neurostimulation: laisser passer le courant

En neurologie, les premières utilisations de l'électricité naturelle des poissons torpilles pour soulager la douleur remontent à l'Antiquité! Depuis, la neurostimulation connaît une évolution spectaculaire. Au cours des années 1960, la théorie du *Gate Control* change en effet la donne: il est désormais établi que l'organisme comporte des mécanismes

physiologiques de régulation du « message douloureux » tout au long de son cheminement jusqu'au cerveau, dont l'un d'eux, majeur, se situe au niveau de la moelle épinière. La neurostimulation électrique est, dès lors, appliquée pour le traitement des douleurs neuropathiques chroniques persistantes... et ce n'est qu'un début! Aujourd'hui, il existe des solutions électriques, magnétiques ou encore électromagnétiques, implantées ou transcutanées, pour le traitement de la douleur comme de certaines pathologies, offrant ainsi des solutions pour l'épilepsie, la maladie de Parkinson ou encore la dépression sévère, selon la zone stimulée. Et ce, avec une précision de plus en plus accrue grâce aux avancées technologiques: miniaturisation des dispositifs, essor des électrodes dites « directionnelles », chirurgie robotisée, imagerie de pointe... et, désormais, intelligence artificielle.

La voie de l'analgésie intrathécale

Il est à noter que d'autres voies sont explorées pour le traitement de la douleur. Parmi elles,

l'analgésie intrathécale, « qui consiste à administrer des antalgiques directement dans l'espace où circule le liquide céphalo-rachidien, au plus près de la moelle épinière donc, grâce à un cathéter relié à une pompe implantée », explique le Dr Dupouiron, chef de service anesthésie et douleur à l'Institut de cancérologie de l'Ouest, à Angers. Cette approche permet d'utiliser des doses plus faibles tout en obtenant un effet antalgique supérieur et en limitant les effets secondaires. « Elle sera probablement, à l'avenir, une voie d'administration privilégiée de médicaments innovants pour le traitement de certaines douleurs résistantes », estime le Dr Dupouiron.

Essor du numérique et de la neurologie connectée

Plus récemment, l'essor du numérique a ouvert la voie à la téléneurologie ou, plus précisément, à la télémedecine en neurologie. Téléconsultation, télé-assistance, télé-expertise, télé-surveillance... La neurologie n'échappe pas à cette nouvelle modalité de prise en charge des patients!

1987

Première stimulation cérébrale profonde réussie à Grenoble

1996

Première stimulation magnétique à action répétitive

Début des années

2000

Apparition des stents intracrâniens

Années

2000

Démocratisation des techniques endovasculaires
Première salle hybride à Monaco

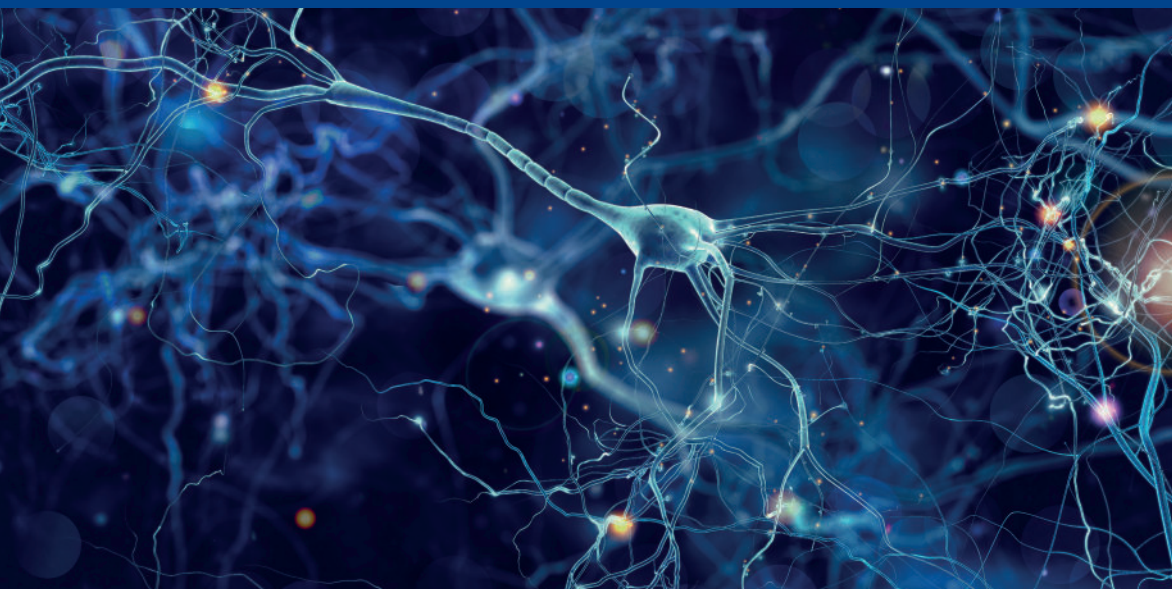
2015

Création de l'acte de thrombectomie mécanique

Années

2020

Essor de la téléneurologie



L'enjeu: répondre aux besoins de ces derniers et faciliter leur accès aux soins sur l'ensemble du territoire national. L'utilisation massive de données de neuro-imagerie, de génomique, de capteurs (entre autres) permet également d'affiner le diagnostic et de le rendre encore plus précoce, personnalisé et dynamique. Par ailleurs, des algorithmes dotés d'intelligence artificielle interviennent – et ils le feront encore davantage dans les années à venir – dans la segmentation automatique des lésions et dans la prédiction de l'évolution des pathologies, notamment la sclérose en plaques et les tumeurs. L'objectif? Développer une neurologie de précision permettant un diagnostic et un traitement toujours plus personnalisés.

3000

Chiffre clé

C'est le nombre de neurologues, en France, en 2024.

Parmi eux, 900 exercent en libéral.

Source: Fédération française de neurologie.

EN QUÊTE D'UN DIAGNOSTIC TOUJOURS PLUS PRÉCIS, RAPIDE ET PERSONNALISÉ

Observer le cerveau reste un défi, mais c'est une condition essentielle pour en comprendre les mécanismes et mieux diagnostiquer les maladies. Les progrès de l'imagerie, du traitement des données et, désormais, de l'intelligence artificielle ouvrent la voie à une médecine neurologique plus précise, rapide et personnalisée.

Arriver à observer le cerveau ne va pas de soi car celui-ci est abrité par la boîte crânienne. Or, c'est justement son observation qui permet de comprendre son fonctionnement, l'apparition et le développement des maladies. La méthode d'imagerie la plus ancienne, la radiographie, est peu informative, les rayons X étant en grande partie absorbés par l'os de la boîte crânienne. L'histoire du diagnostic en imagerie est donc indissociable des progrès réalisés dans le domaine de l'imagerie, d'une part, et dans celui de l'enregistrement de l'activité électrique du cerveau, d'autre part.

Améliorer encore le diagnostic

Pourtant, malgré d'indéniables progrès, une certaine errance diagnostique persiste, notamment en ce qui concerne les maladies rares. Réduire cette errance est donc une priorité. Il est également nécessaire d'améliorer

encore la prise en charge des épisodes neurologiques aigus, dont les accidents vasculaires cérébraux (AVC). Rappelons en effet que l'efficacité des traitements – qu'il s'agisse de la fibrinolyse^⑥ ou de la thrombectomie^⑦ – dépend de leur administration précoce.

Encadrer le recours à l'IA

Un autre enjeu réside dans l'essor de l'intelligence artificielle (IA), qu'il faut parvenir à intégrer de manière tout à la fois sécurisée, éthique et responsable. En effet, si l'IA ouvre de vastes et prometteuses perspectives en matière de diagnostic présymptomatique, accélérant ainsi la détection des maladies neurodégénératives, son intégration pose toutefois de nombreuses questions, en termes de responsabilité, de transparence et de fiabilité.

VOIR TOUJOURS PLUS, TOUJOURS MIEUX

Longtemps réservée à l'étude de l'anatomie cérébrale, la neuro-imagerie est devenue un outil de mesure, d'aide au diagnostic et même de prédiction thérapeutique. Tour d'horizon d'un domaine en perpétuelle évolution, à la croisée des données, de l'innovation médicale et de la pratique clinique.



DE LA THÉORIE...

L'imagerie cérébrale, ou neuro-imagerie, regroupe l'ensemble des techniques et outils d'imagerie utilisés pour observer le cerveau, une tâche complexifiée par la boîte crânienne qui le protège. Sans elle, point de diagnostic neurologique!

On distingue la neuro-imagerie structurelle de la neuro-imagerie fonctionnelle. La première, particulièrement utile au diagnostic, a pour objectif d'étudier l'anatomie du cerveau et d'en identifier les lésions ou anomalies (tumeur, malformation,

hémorragie, déformation pathologique, etc.). Les principaux dispositifs utilisés actuellement dans ce cadre sont le scanner assisté par ordinateur (tomographie, tomodensitométrie) et l'imagerie par résonance magnétique (IRM) anatomique.

La neuro-imagerie fonctionnelle cherche, quant à elle, à caractériser l'activité de certaines zones du cerveau lorsque celui-ci est en action. En d'autres termes, il s'agit de mesurer le signal produit par le cerveau lorsqu'un individu effectue une tâche cognitive. On utilise principalement pour cela l'IRM fonctionnelle (IRMf). >>>

Années
1920

Émergence
des rayons X

Début des années
1970

Essor de la
tomodensitométrie

Années
1980

Avènement de
l'IRM anatomique

Années
1990

Avènement de
l'IRM fonctionnelle

Années
1990-2000

Avènement de
la médecine nucléaire

À LA PRATIQUE

En situation d'urgence, on privilégie le plus souvent le scanner cérébral, notamment pour rechercher un hématome – que celui-ci soit intracérébral, extra-cérébral ou sous-dural. Concernant l'imagerie par résonance magnétique (IRM), son indication phare en urgence est l'accident vasculaire cérébral ischémique.

UNE HISTOIRE D'INNOVATION

Avant l'imagerie, le diagnostic en neurologie repose sur des méthodes indirectes – essentiellement l'examen clinique, la ponction lombaire ou l'encéphalogramme. L'arrivée des rayons X dans les années 1920 change la donne. La pneumo-encéphalographie, mise au point par le neurochirurgien et scientifique américain Walter Dandy, consiste à réaliser une radiographie du cerveau en remplaçant le liquide cérébral par de l'air. Mais l'examen est invasif et douloureux. Suit l'angiographie cérébrale, toujours utilisée aujourd'hui dans sa version moderne.

La révolution du scanner

Au début des années 1970, Godfrey Hounsfield et Allan Cormack mettent au point le tomodensitomètre (ou scanner à rayons X), premier outil non invasif permettant de visualiser des structures internes du cerveau en coupe. Pour y parvenir, ils remplacent le film utilisé en radiographie par des capteurs électroniques très sensibles aux rayons X. Ils associent leur dispositif avec un ordinateur pour reconstruire le contenu du corps coupe par coupe. Il a fallu à l'ordinateur cinq minutes pour saisir les images, et deux heures et demie pour les traiter.

Un arsenal diagnostique de plus en plus large

Les années 1980 voient se répandre les IRM, dont la résolution permet de visualiser en détail les tissus mous du cerveau et de la moelle épinière. Avec elles, le diagnostic en neurologie fait de grandes avancées, tant pour les tumeurs que pour les AVC ischémiques[Ⓞ], les maladies neuro-dégénératives ou encore la sclérose en plaques.

Au cours des années 1990, les images issues d'IRM fonctionnelles, qui permettent de visualiser l'activité cérébrale en temps réel, font bouger les lignes. C'est à la même époque que la médecine nucléaire prend son essor, d'abord avec la tomographie par émission de positons[Ⓞ] (TEP), qui utilise des traceurs radioactifs pour évaluer le métabolisme cérébral, puis avec la tomographie par émission monophotonique[Ⓞ] (TEMP), qui repose sur la scintigraphie pour évaluer la perfusion cérébrale.

Une multiplication des usages de l'IRM

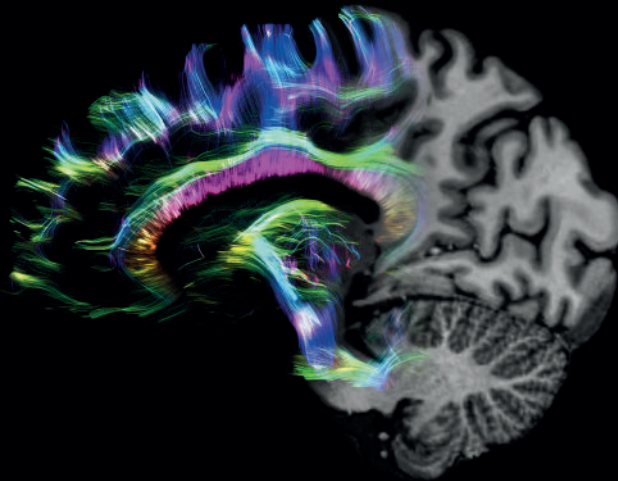
Aujourd'hui, « l'un des principaux changements est que l'IRM n'est plus seulement utilisée comme appareil d'imagerie, mais également pour effectuer des mesures », explique le Pr Damien Galanaud, spécialiste en neurodiagnostic et neuroradiologue à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière (AP-HP), à Paris. *On peut ainsi mesurer la vascularisation des tumeurs cérébrales pour orienter sur leur type ou déterminer la réponse au traitement, l'atrophie cérébrale pour aider au diagnostic de maladies type Alzheimer,*

2007

Création de NeuroSpin
– Institut Frédéric Joliot

Années
2020

Avènement de l'intelligence
artificielle et de l'imagerie
multimodale



4
minutes

Chiffre clé

C'est le temps qu'il a fallu à l'IRM de 11,7 teslas de Neurospin pour prendre, en 2024, des images du cerveau d'un niveau de résolution jamais atteint.

Source: Commissariat à l'énergie atomique (CEA), avril 2024.

la matière blanche pour les traumatismes crâniens ou le suivi de certaines maladies et même certains métabolites afin de diagnostiquer, à l'aide de la spectroscopie, des mutations dans les tumeurs cérébrales, lesquelles détermineront fortement le diagnostic et le suivi de la réponse thérapeutique.»

Une méthode qui permet d'identifier beaucoup plus rapidement une éventuelle non-réponse, et ainsi de changer en conséquence la ligne de chimiothérapie.

Un autre intérêt concerne les essais thérapeutiques, comme le souligne le Pr Galanaud: «Les marqueurs IRM étant beaucoup plus sensibles, on a besoin de moins de patients pour montrer l'efficacité ou la futilité d'un traitement. C'est particulièrement intéressant pour les maladies rares, qui concernent par définition très peu de patients et pour lesquelles il est souvent compliqué de prouver l'efficacité des traitements.»

Numérique et intelligence artificielle

L'avènement des technologies numériques rebat lui aussi les cartes. Ainsi, la fusion d'images (scanner ou IRM et TEP) rend possible la superposition de données anatomiques et métaboliques pour un diagnostic de plus en plus précis. Pour sa part, l'imagerie connectée et en temps réel ouvre la voie à la télé-expertise et à la téléradiologie en neurologie d'urgence, notamment pour la prise en charge des accidents vasculaires cérébraux (AVC). L'imagerie ultra-haute résolution, par >>>



»» ailleurs, rendue possible grâce aux IRM à haut champ (7 teslas), pourrait par ailleurs révolutionner l'observation des microstructures cérébrales. Enfin, on se dirige très progressivement vers une neuro-imagerie personnalisée avec des trajectoires thérapeutiques spécifiques selon l'imagerie individuelle.

L'intelligence artificielle permet quant à elle d'automatiser et d'améliorer les processus de radiologie. Certains algorithmes dotés d'IA sont capables de détecter automatiquement des lésions, des AVC ischémiques ou hémorragiques, ou encore des signes précoces de démence.

Observer les mouvements des yeux pour détecter les pathologies difficilement décelables

Issue de l'ophtalmologie et des sciences cognitives, l'oculométrie s'applique aussi à la neurologie. Elle permet de tester le fonctionnement de régions spécifiques du cerveau grâce à l'analyse des mouvements des yeux et de la tête selon des algorithmes. Elle aide ainsi au diagnostic précoce de maladies neurologiques et psychiatriques, ainsi que de troubles de la lecture comme la dyslexie. L'oculométrie consiste en une caméra fixée sur un casque, lui-même relié à un ordinateur sur lequel sont projetés des tests d'oculométrie. La caméra enregistre le mouvement des yeux et transmet les informations à un logiciel qui examine le temps de réaction de l'œil, de la vitesse et de la précision sur la cible. Le médecin interprète ensuite les résultats. On doit ce dispositif à Serge Kinkingnehun, chercheur à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière (AP-HP), à Paris.

En 2001, alors qu'il étudie les examens d'IRM dans le cadre de la maladie d'Alzheimer, il est sollicité par des neurologues et des psychiatres pour mettre au point des tests informatisés qui fonctionnent automatiquement. Il découvre une méthode développée par des confrères sur le travail des yeux au moyen d'électrodes, fonctionnant grâce à une barre de diodes. Son équipe lui demande alors de concevoir une version modernisée de ce dispositif. Il remplace les électrodes par une caméra et la barre de diodes par des écrans d'ordinateur. L'analyse est automatisée et les mouvements oculaires enregistrés, alors qu'ils étaient auparavant imprimés puis analysés avec une règle et un crayon. En 2007, Serge Kinkingnehun décroche la bourse Charles-Foix qui lui permet de mener une nouvelle étude sur le syndrome parkinsonien.

Des images de meilleure qualité et en plus grande quantité...

Ces progrès apportés aux machines entraînent la génération de plus grandes quantités d'images, pointe le Pr Galanaud : « Au début de ma carrière, dans les années 1990, les IRM fournissaient entre 40 et 100 images. Aujourd'hui, il n'est pas rare d'avoir quelque 10 000 images. » Celles-ci sont par ailleurs plus volumineuses désormais : « Il y a 30 ans, la résolution classique d'une image était de l'ordre du voxel (soit 1,5x1,5x5 millimètres), poursuit le Pr Galanaud. Actuellement, avec les systèmes de deep learning, les méthodes permettent de reconstruire des images beaucoup plus précises – certaines sont de l'ordre de 0,5x0,5x0,5 millimètres – et on produit des images huit fois plus volumineuses. Cela a évidemment un impact sur les capacités de stockage, les réseaux et les systèmes de visualisation. »

Qui nécessitent une nouvelle approche

Une masse d'informations qui implique d'adopter une nouvelle manière de lire les images : « On a donc besoin de logiciels de visualisation et de post-traitement de plus en plus complexes, et capables de gérer des volumes de données de plus en plus importants pour interpréter les images », constate le Pr Galanaud. La question de savoir comment gérer cette masse de données fait partie des défis

des années à venir. En cela, la radiomique, qui consiste à analyser à grande échelle des données provenant des examens d'imagerie via des outils mathématiques et d'intelligence artificielle, ouvre de belles perspectives.

« Cela va devenir indispensable, car on génère un tel volume de données que ce n'est plus faisable par l'œil humain, poursuit-il. En biologie médicale par exemple, les appareils sont déjà très calibrés ; c'est beaucoup plus compliqué pour l'IRM, pour laquelle il y a un premier niveau de calibration mais qui est insuffisant pour certains types de données », poursuit le Pr Galanaud.

Une profession qui doit s'adapter

En neuroradiologie, domaine qui a vu se succéder les films sur négatoscope, les films imprimés laser puis la lecture sur le PACS®, l'adaptation permanente aux nouveaux moyens de lecture d'images a toujours été nécessaire. « Désormais, nous passons à un nouveau système qui permet une prélecture par des logiciels de plus en plus performants avant l'interprétation du professionnel », résume le Pr Galanaud. Mais celui-ci ne croit pas pour autant à un remplacement du neuroradiologue par la machine : « Si cela change notre manière de travailler, ce n'est qu'un outil. Et de fait, un logiciel entraîné pour déterminer une chose en particulier ne verra pas ce qu'il y a à côté. Il va mesurer les tumeurs, mais il faut vérifier derrière afin de savoir si c'est effectivement la bonne réponse ou pas. »

Un centre unique en Europe dédié aux neurosciences

En 2007 est créé Neurospin, un centre unique en Europe dédié à la recherche pour l'innovation en imagerie cérébrale, notamment grâce à des IRM puissantes. Son objectif ? Favoriser les synergies entre médecins, physiciens, informaticiens et psychologues. « Les recherches conduites, centrées sur la neuro-imagerie, vont des développements technologiques et méthodologiques (acquisition et traitement des données) aux neurosciences précliniques et cliniques, incluant les neurosciences cognitives », détaille l'Institut des sciences du vivant Frédéric-Joliot. On y trouve une IRM de 11,7 teslas, utilisée dans le cadre du projet Iseult, pour observer le cerveau à l'échelle de quelques milliers de neurones et formuler des hypothèses totalement nouvelles sur son fonctionnement. Des travaux en neurosciences qui vont de pair avec une R&D dédiée aux composantes des appareils (antennes pour la transmission des signaux cérébraux, gradients de champs magnétiques, etc.) et sur les algorithmes de reconstruction d'images.

EXPLORER POUR MIEUX DIAGNOSTIQUER

En enregistrant l'activité électrique du cerveau, les électrodes peuvent aider au diagnostic des pathologies neurologiques, permettant ainsi de mieux guider le traitement. Elles constituent une étape préopératoire indispensable dans le cadre de la prise en charge de l'épilepsie.

DE LA THÉORIE...

L'électroencéphalogramme (EEG) est un dispositif permettant de mesurer l'activité électrique du cerveau. C'est le seul marqueur en temps réel de l'activité cérébrale. Le cerveau travaille en permanence, même pendant le sommeil. L'EEG traduit ces courants sous forme de courbes caractéristiques de chaque région du cerveau, lesquelles sont ensuite analysées par le médecin. Il sert notamment à prendre en charge l'épilepsie, indiquant l'endroit où des convulsions et des crises épileptiques commencent.

À LA PRATIQUE

Il existe différentes techniques de mesure de l'activité du cerveau. Ainsi, l'EEG cutané de surface consiste à recueillir l'activité bioélectrique cérébrale au moyen d'électrodes. L'EEG sous-dural, aussi appelé corticographie[®], consiste quant à lui à disposer des électrodes sur le cortex cérébral pour enregistrer les anomalies. La stéréoélectroencéphalographie (SEEG) est réalisée à l'aide d'électrodes implantées dans la profondeur du cerveau, notamment pour l'exploration intracérébrale des épilepsies partielles pharmacorésistantes. D'autres techniques particulières d'enregistrement peuvent par ailleurs être utilisées: EEG de sommeil chez l'adulte, EEG avec activation médicamenteuse, EEG couplé avec un enregistrement vidéo du comportement du patient, enregistrement à distance ou télémétrie, enregistrement ambulatoire...

UNE HISTOIRE D'INNOVATION

Les premières études sur l'activité électrique du cerveau n'auraient pu exister sans l'invention de l'électroencéphalogramme (EEG), en 1875, par le scientifique britannique Richard Caton. Puis, au cours des années 1920, des premières études chez l'homme sont menées par le physiologiste allemand Hans Berger. En 1929, celui-ci enregistre le premier signal d'activité cérébrale et décrit les premiers types d'ondes cérébrales ainsi que les tracés inhabituels chez les patients épileptiques. Mais il faut attendre les années 1950 pour que l'EEG soit couramment utilisé dans la pratique médicale, en particulier pour le diagnostic de l'épilepsie. En 1968, l'invention de la magnétoencéphalographie (MEG), par les Américains David Cohen et James Zimmerman, change la donne: avec cette méthode de neuro-imagerie, consistant à enregistrer en temps réel l'activité électromagnétique du cerveau, le crâne ne constitue plus, désormais, une barrière.

Des électrodes implantées dans le cerveau

En 1974, l'équipe du psychiatre et neurochirurgien français Jean Talairach, qui avait réalisé la première opération de stéréotaxie (procédure opératoire guidée par l'image) en 1948, a l'idée d'implanter des électrodes dans le cerveau, marquant ainsi les prémices de la stéréoélectroencéphalographie (SEEG), ou électroencéphalographie stéréotaxique.

1875

Invention de l'électroencéphalogramme (EEG)

Années

1920

Premiers enregistrements de l'activité cérébrale électrique chez l'homme

1968

Invention de la magnéto-encéphalographie

Années

2000

Développement de la stéréoelectro-encéphalographie (SEEG)

Années

2010

Miniaturisation et amélioration de la résolution

Cet examen repose sur la mesure de l'activité électrique du cerveau dans le but de diagnostiquer une pathologie neurologique ou suivre les effets d'un traitement. Une véritable révolution puisqu'auparavant, les électrodes étaient déposées à la surface du cortex. La SEEG est rapidement utilisée dès le début des années 2000. Ces électrodes invasives sont utilisées pour une période d'exploration de quelques jours à deux semaines. Outre l'amélioration de leur connectique, elles ont également été considérablement miniaturisées. Elles mesurent moins de 1 millimètre de diamètre (au lieu de 2,45 originellement), et de 15 à 60 millimètres de longueur.

Plus de précision, moins d'invasivité

Jusque dans les années 2000, les stéréoelectro-encéphalographies sont utilisées en France de manière relativement confidentielle, essentiellement à Paris, Rennes et Lyon. Puis, peu à peu, la méthode se développe et se répand, remplaçant progressivement la corticographie®.

En effet, la première permettant des enregistrements à l'intérieur du cerveau, ceux-ci sont plus fins et précis qu'en sa surface, permettant d'observer très précisément les crises d'épilepsies naissant dans la face interne du lobe temporal. En outre, cette méthode, moins invasive que la corticographie®, qui nécessite d'ouvrir le crâne, est plus confortable pour le patient.

Du diagnostic au traitement

Le diagnostic est encore amélioré grâce à l'apparition de microélectrodes capables d'enregistrer des phénomènes très fins au niveau d'un tout petit groupe de neurones. On peut également réaliser des microdialyses, c'est-à-dire analyser les produits chimiques sécrétés dans l'environnement de la microélectrode.

Après avoir été cantonnées à un rôle diagnostic, les électrodes commencent à intervenir aussi en thérapeutique, par exemple dans le cadre de thermocoagulations pour détruire des lésions à l'intérieur du cerveau grâce à un générateur de radiofréquences qui envoie un courant entre deux

contacts de l'électrode. Cela provoque un échauffement et une nécrose de la lésion, permettant de guérir dans certains cas des structures, en particulier dans le lobe temporal.

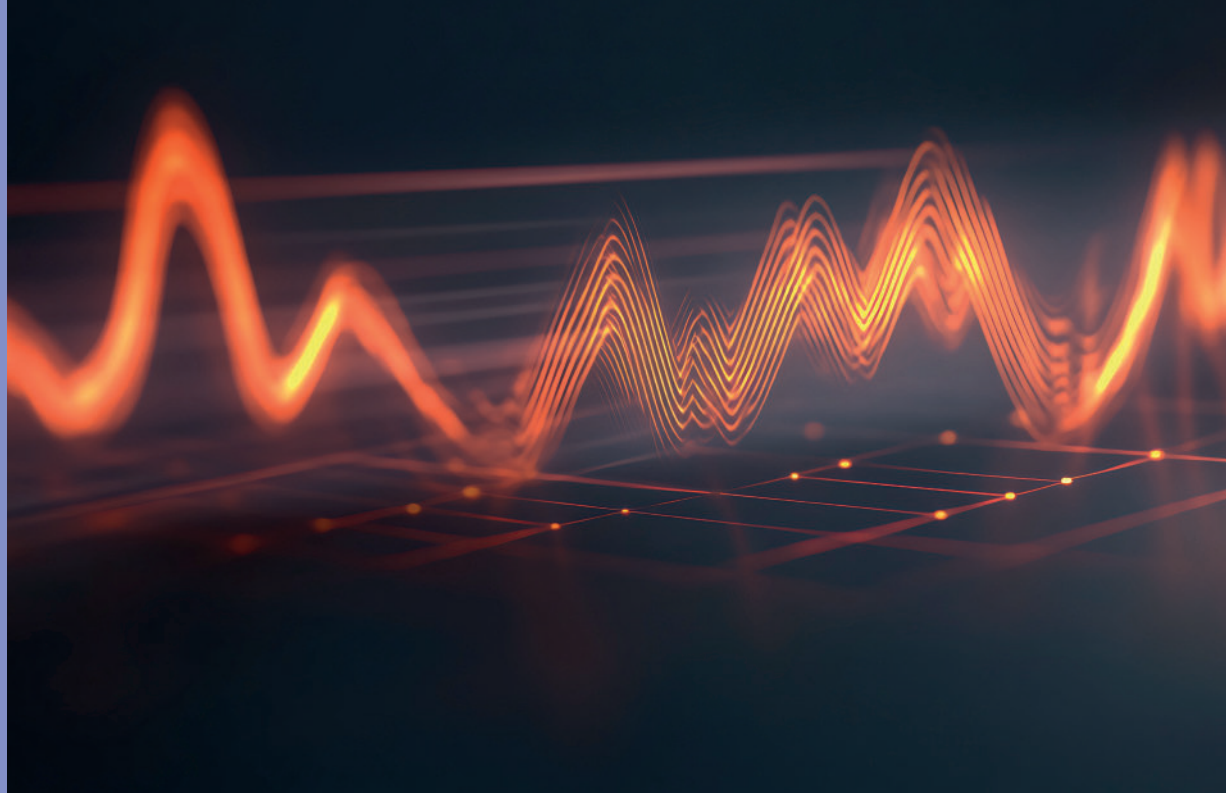
Une diversification des usages

Depuis les années 2010, un travail conséquent a été mené sur la miniaturisation et la portabilité des appareils d'électroencéphalogramme, si bien qu'il est possible désormais de réaliser des EEG de longue durée en ambulatoire au domicile du patient. Dans ce cas, les données sont enregistrées pour être ensuite transmises aux professionnels de santé.

La résolution des enregistrements électroencéphalographiques a également été améliorée, avec des dispositifs dotés de 64, 128 voire 256 électrodes. Enfin, l'EEG connaît aujourd'hui un regain d'intérêt en psychiatrie, notamment pour la détection précoce de certains troubles psychiatriques, tels que la schizophrénie ou les troubles de l'humeur.

ACTIVITÉ ÉLECTRIQUE DU SYSTÈME NERVEUX PÉRIPHÉRIQUE: AU-DELÀ DE L'EXAMEN CLINIQUE

Indispensable au diagnostic des pathologies du système nerveux périphérique, l'électroneuromyographie (ENMG) enregistre l'activité électrique des nerfs et des muscles.



DE LA THÉORIE...

Pour rappel, le système nerveux central est composé de l'encéphale et de la moelle épinière. Le système nerveux périphérique, quant à lui, part de la corne antérieure de la moelle épinière et est composé des nerfs, des muscles et des jonctions entre les deux, dites neuromusculaires.

En cas de suspicion d'une pathologie touchant ce dernier, « l'examen clinique est complété par une électroneuromyographie (ENMG), comme l'IRM en est le prolongement pour le système nerveux central »,

explique le Dr Thierry Maisonobe, responsable de l'unité d'exploration d'électromyographie pour les neuropathies à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière (AP-HP), à Paris.

L'ENMG permet d'enregistrer l'activité électrique des nerfs et des muscles pour rechercher une éventuelle atteinte et préciser un diagnostic, notamment d'atteintes nerveuses (comme, par exemple, celui du nerf médian au poignet au niveau du canal carpien), de neuropathies périphériques, de maladies des motoneurones, de myasthénies ou encore de myopathies.

Fin du
18^e
siècle

1843

1890

Années

1950-60

Années

1970

Années

1980-90

Découverte de
l'activité électrique
musculaire

Naissance de
l'électrophysiologie

Apparition de
l'électromyographie
(EMG)

Premiers systèmes
analogiques d'EMG

Premiers
systèmes
numériques

Informatisation
de l'EMG

À LA PRATIQUE

« L'ENMG a pour mission de répondre à une question formulée lors de l'examen clinique. Cette exploration en profondeur et très complète comporte quatre axes d'études importantes, précise le D^r Maisonobe. Les trois premières – étude de la conduction nerveuse motrice des muscles, étude de la conduction nerveuse sensitive des nerfs, étude fonctionnelle de la jonction neuromusculaire – sont réalisées par stimulation électrique. La quatrième, l'étude fonctionnelle du muscle, est réalisée au moyen d'une aiguille électrode qui enregistre les contractions mécaniques. » Le protocole d'exploration dépend de la question posée par l'examen clinique et l'opérateur (voir encadré p. 20).

UNE HISTOIRE D'INNOVATION

C'est à la fin du XVIII^e siècle que l'Italien Luigi Galvani pose les bases de l'existence d'une activité électrique dans les nerfs et les muscles des animaux – en l'occurrence, une grenouille. Mais sa découverte ne fait pas l'unanimité, contestée notamment par les partisans d'un certain Alessandro Volta, qui

maintiennent que les contractions musculaires observées par Galvani sont en fait un artefact d'électricité générée par le contact entre le tissu organique et le métal utilisé dans le cadre de l'expérience. L'Allemand Emil Heinrich du Bois-Reymond met fin à la polémique en démontrant la nature électrique des signaux nerveux, donnant naissance, en 1843, à l'électrophysiologie[®].

Dans la foulée, « le neurologue français Duchenne de Boulogne constate que, en stimulant avec un courant électrique, on obtient une réponse physiologique que l'on peut enregistrer. En ce milieu du XIX^e siècle, il devient ainsi le premier à utiliser l'électricité comme instrument d'expérimentation physiologique », raconte le D^r Maisonobe. En 1890, le physiologiste Étienne-Jules Marey boucle la boucle, réalisant le premier enregistrement de l'activité musculaire, puis introduisant le terme d'électromyographie.

De l'analogique au numérique

Une grande étape de développement survient dans les années 1950-60 aux États-Unis avec le perfectionnement de la méthode, notamment grâce à >>>



l'utilisation d'un oscilloscope, la commercialisation du premier système d'EMG et « *la formalisation de l'examen*, poursuit le D^r Maisonobe. *Jean Scherrer rapporte les premières machines en France dans les années 1960 et ouvre le premier laboratoire d'EMG à la Pitié-Salpêtrière. On commence ensuite la stimulation et les aiguilles* ».

Au cours des années 1970, les premiers systèmes numériques modulaires apparaissent; ils sont plus modernes que les systèmes analogiques jusqu'alors en fonction, mais dont les examens sont toujours réalisés sur papier. Le D^r Maisonobe poursuit: « *C'est l'arrivée de l'informatique dans les années 1980-90 qui va révolutionner la spécialité, permettant d'examiner bien plus que les seuls nerfs, de répéter les examens et d'en augmenter la fiabilité*. »

Un atout: l'analyse fonctionnelle

Aujourd'hui, les innovations portent sur les outils périphériques et les logiciels permettant notamment « *d'analyser les petites fibres qui participent au système nerveux autonome et que l'on ne pouvait pas explorer auparavant ou encore d'enregistrer l'excitabilité* », pointe le D^r Maisonobe.

En effet, l'examen d'ENMG – en tant que tel – semble être arrivé à maturité, et « *certains se demandent même si la discipline n'a pas atteint un plafond de verre, voire si nous n'allons pas être supplantés*, développe le D^r Maisonobe. *Ainsi, les avancées en échographie et en IRM sur les nerfs et les muscles sont telles que l'on pourrait penser*

l'ENMG vouée à une mort certaine. D'autant que ces examens d'imagerie présentent l'avantage d'être moins invasifs et totalement indolores par rapport au courant électrique et aux aiguilles, quand bien même de gros progrès ont été réalisés sur ce plan. Pour autant, cela ne saurait remplacer l'analyse fonctionnelle du système nerveux réalisée par les experts de la neurophysiologie. À ce titre, nous restons donc en première ligne pour le diagnostic des pathologies du système nerveux périphérique. »

Un examen dépendant de facteurs extérieurs

Par rapport à d'autres explorations de type neurologique, l'électroneuromyographie (ENMG) dépend de différents facteurs. « *Il est d'abord extrêmement médecin-dépendant, chacun ayant sa propre façon de procéder* », détaille le D^r Thierry Maisonobe, responsable de l'unité d'exploration d'électromyographie pour les neuropathies à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière (AP-HP). Il dépend également des quatre temps d'exploration, puisqu'il existe plusieurs

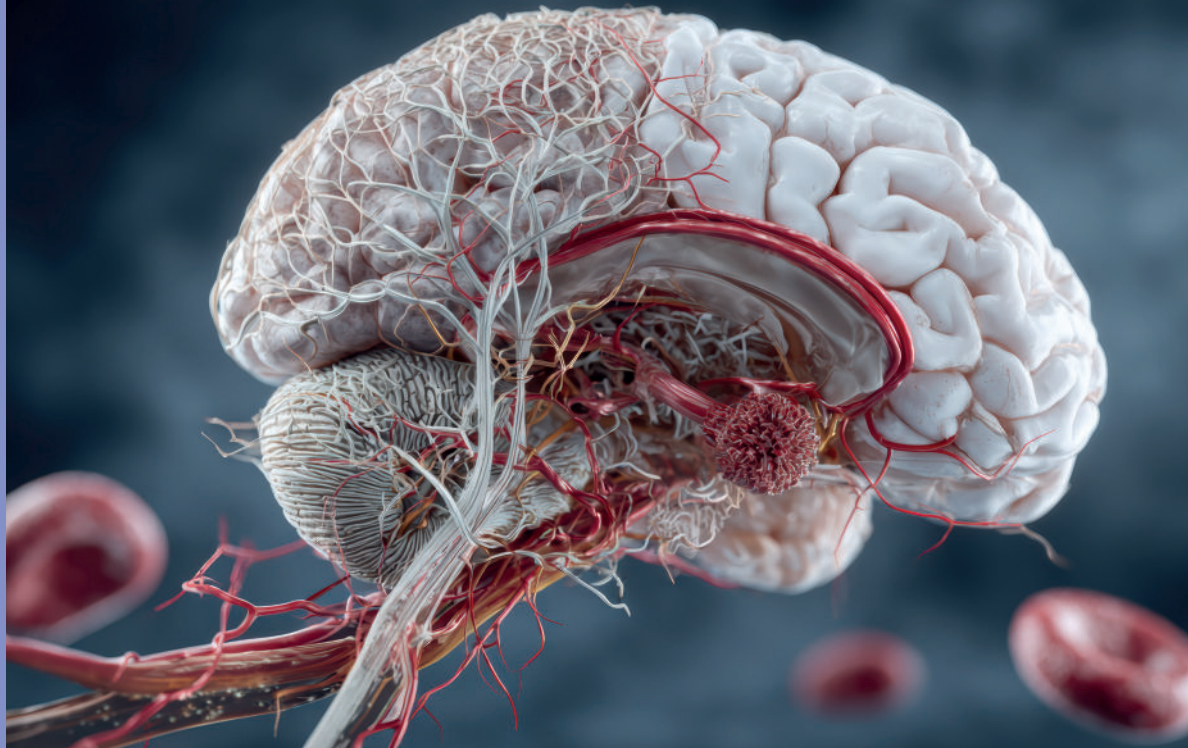
nerfs moteurs, plusieurs endroits ou encore plusieurs muscles possibles. Enfin, l'examen ne sera jamais le même d'un patient à un autre, puisqu'il diffère selon la question et l'indication posées, comme l'illustre le D^r Maisonobe: « *Par exemple, pour une fatigabilité à l'effort qui va entraîner une suspicion d'anomalie de la jonction neuromusculaire, on effectue les quatre temps mais avec une majeure pour le troisième temps. En revanche, pour un patient qui présente une paralysie permanente et une amyotrophie de la main, on va réaliser une analyse particulière des nerfs moteurs, un peu d'analyse sensitive mais très peu de jonction.* »

C'est pourquoi la clarté et la rigueur de la demande initiale d'examen sont déterminantes: « *L'idéal est d'avoir une question précise issue de l'examen clinique qui oriente la réponse à rechercher*, explique le D^r Maisonobe. *Plus la question posée par le neurologue clinicien est précise, et plus le nombre d'éléments fournis est important, plus notre recherche sera adéquate pour répondre à la question. Et par corrélation, plus le neurologue clinicien est spécialiste des maladies périphériques, plus cela nous oriente. Sans cela, il nous faut procéder à notre propre examen clinique pour pouvoir formuler la question qui n'a pas été formulée.* »

MATIÈRE BLANCHE

MESURER LES LÉSIONS DE LA MATIÈRE BLANCHE

Depuis quelques années, un dispositif médical numérique reposant sur la mesure de la matière blanche est en cours de déploiement. Son intérêt? Améliorer le diagnostic, le suivi et la prédiction de l'évolution des maladies et troubles neurologiques (maladies d'Alzheimer, de Parkinson, de la myéline, de la sclérose latérale amyotrophique, traumatismes crâniens).



DE LA THÉORIE...

Souvent plus connue que la matière blanche, la matière grise, composée de milliards de cellules nerveuses, des neurones et des cellules gliales, ne constitue pourtant que 20% du cerveau. Les 80% restants sont constitués de la substance blanche, composée de fibres. Ce sont ces dernières qui assurent les connexions entre les différentes parties du cerveau. Là où la mesure de l'activité électrique du cerveau est le reflet de situations et de circonstances, celle de la substance blanche renseigne sur l'état des voies de communication

à l'intérieur du cerveau. Les deux techniques diagnostiques permettant d'étudier ces deux activités sont donc complémentaires.

« *Le cerveau se détériorant avec l'âge, il y a une fluctuation liée à ce paramètre dont il faut nécessairement tenir compte*, explique le Pr Louis Puybasset, chef de l'unité de neuroréanimation chirurgicale de l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière (AP-HP), à Paris. *Mesurer l'état anatomique de la matière blanche selon certains paramètres normatifs, de manière répétée dans le temps, nous permet de mesurer l'intensité de diverses pathologies corrélées à ces paramètres et l'effet éventuel des traitements.* » >>>

À LA PRATIQUE

Ce qui est recherché dans la matière blanche étant invisible à l'œil nu, son point de départ ne saurait être un cliché mais une donnée d'imagerie. Il faut donc transformer l'image à l'aide d'une plateforme logicielle dotée d'un algorithme mathématique qui permet de traiter et de traduire les données d'imagerie en mesures sur différentes zones pour vérifier l'intégrité des tissus.



« On réalise une séquence d'IRM spécifique, appelée diffusion, et utilisée en routine sur la base de directions d'acquisition du signal. Actuellement, on utilise des tenseurs de diffusion de trente à soixante directions d'acquisition, décrit le Pr Puybasset. Le principe consiste à mesurer localement à l'échelle du voxel (c'est-à-dire 2x2x2 millimètres) le mouvement de l'eau dans la matière blanche sous la contrainte de l'aimant de l'IRM. » Cette technique permet de mesurer la diffusion de l'eau : moins le mouvement de l'eau est contraint par les fibres nerveuses et les gaines de myéline, plus le tissu est abîmé. Mais pour évaluer cela, « il faut calibrer l'IRM et, donc, connaître la norme sur un cerveau normal d'un sujet sain, dans une certaine gamme d'âges. On établit ensuite une norme par voxel. Puis on réunit les voxels – plusieurs centaines – entre eux dans les régions d'intérêt avant de déterminer une variabilité par rapport à la norme », poursuit le Pr Puybasset.

UNE HISTOIRE D'INNOVATION

Si la technique existe depuis une trentaine d'années, elle n'est pas encore exploitée pour la prise de décision. En effet, comme celle-ci repose sur quelque chose d'invisible pour l'œil humain, il n'est pas possible de la vérifier par ce biais – d'où la nécessité de la traduire mathématiquement. Cependant, la mesure des lésions de la substance blanche offre déjà de belles opportunités pour certaines pathologies neurologiques en termes de diagnostic, de vérification d'hypothèses et de suivi de l'évolution, et donc de l'efficacité thérapeutique.

Un outil de plus dans l'arsenal diagnostic neurologique

Outre le suivi des maladies de la myéline (voir focus p. 24), l'outil de mesure de la matière blanche intervient aujourd'hui « pour le diagnostic de la maladie de Parkinson avec une quasi-normalité du tenseur, détaille le Pr Puybasset. Nous n'avons pas encore de preuves, mais nous subodorons également que cela va être fondamental pour la sclérose en plaques. Nous allons aussi mener des recherches pour le diagnostic de l'accident vasculaire cérébral (AVC) ». Quant à la maladie d'Alzheimer, comme le précise le Pr Puybasset, si « les recherches sur l'impact de la matière blanche en phase précoce n'en sont qu'à leurs débuts », l'outil permettrait de mesurer les effets indésirables des thérapies.

Prédire le retour à la conscience après un coma

Cet outil rend possible le calcul de la probabilité de retour à la conscience pour les patients dans le coma, permettant ainsi la prise de décision. « Nous avons constitué une banque de données comparant la mesure réalisée par IRM en réanimation lorsque le malade comateux est stabilisé et que les lésions ne sont plus évolutives à son état clinique à un an », explique le Pr Puybasset.

Ce qui permet d'obtenir une corrélation, puis de réaliser des manœuvres statistiques validées sur une grande cohorte, pour prédire le pronostic. « On peut connaître le devenir des patients de manière très

Années
1990

Début de la mesure de la matière blanche

Années
2020

Poursuite des recherches autour des usages de la mesure de la matière blanche



1,3
million

Chiffre clé

C'est le nombre de personnes touchées par une maladie neurodégénérative en France en 2024.

Source: Fondation Recherche Alzheimer, 2024.

précise et, ainsi, prendre des mesures thérapeutiques – à savoir continuer ou arrêter le traitement, poursuit le Pr Puybasset. En effet, la conscience résulte d'une sorte de conversation dans le cerveau qui transite par la matière blanche. Si ses fibres sont détériorées, il n'y a plus de conversation et, donc, plus de retour à la conscience possible. Il conclut : «*En termes de diagnostic des lésions de la matière blanche, on ne pourra pas mieux faire que ce que l'on fait déjà aujourd'hui avec cet outil. Pour autant, s'il y a des zones d'affirmation du pronostic, bon comme mauvais, il persiste également une zone de non-décision de l'ordre de 30%.*»

Un immense champ des possibles

De nombreuses recherches sont donc en cours, et à venir, pour développer ce nouvel outil. «*Il y a un champ des possibles colossal autour de la mesure de la matière blanche, prévoit le Pr Puybasset. De fait, la mesure de la substance blanche est très robuste de par son caractère physique: l'usage de l'outil est donc très au point et solide.*» Mais attention, car l'analyse de la matière blanche profonde dépend de l'âge, du patient et du délai d'acquisition de l'IRM. «*C'est pourquoi il est essentiel de bien normer les appareils d'IRM et de continuer à construire des banques de données de mesures comme on le fait depuis une vingtaine d'années, pour ensuite trouver des indications pathologie par pathologie. Ou, en d'autres termes, d'établir la place de l'outil maladie par maladie.*», résume le Pr Puybasset. >>>

FOCUS

De l'intérêt du suivi de la matière blanche pour les leucodystrophies

Les leucodystrophies sont des maladies génétiques affectant la substance blanche du cerveau, ou myéline.

«L'avantage de la mesure de la substance blanche par tenseur de diffusion \mathbf{G} est qu'elle peut servir de façon individuelle sans avoir besoin de passer par une analyse de groupe, explique le Pr Fanny Mochel, généticienne et médecin-chercheuse qui travaille sur ces pathologies dans le cadre de deux centres de référence nationaux dédiés aux maladies rares (CRMR leucodystrophies \mathbf{G} et CRMR maladies neurométaboliques). Il s'agit en pratique de réaliser une cartographie des tenseurs de diffusion à l'échelle individuelle pour un patient à un instant 't' que l'on va comparer à une base de données témoin. Puis on va ensuite suivre dans le temps et pouvoir prendre des décisions à l'échelle individuelle.»

Jusqu'à présent, le dispositif n'était disponible que dans le cadre de recherches. Il l'est dans le cadre clinique désormais, en soins courants, avec un marquage CE et une cartographie individuelle permettant une médecine personnalisée. «On s'en sert surtout pour évaluer le pronostic et le suivi de l'aggravation de la maladie, comparativement à la mise en route de

traitements, poursuit le Pr Mochel. Pour certaines leucodystrophies \mathbf{G} , nous pouvons pratiquer des greffes de moelle osseuse. L'idée est de se dire que, dans ces maladies, il y a une atteinte du système immunitaire du cerveau, appelée microglie, qui a un fort impact sur le déclenchement de la maladie et son aggravation.» Et de préciser: «Si l'on intervient précocement en remplaçant le système immunitaire d'une personne malade par celui d'un sujet sain via la greffe, on va également remplacer la microglie malade de cette personne qui provient de la moelle. Cela a un effet radical sur l'arrêt de la pathologie sur le plan inflammatoire.»

Les méthodes de tenseur de diffusion \mathbf{G} ont aussi «un potentiel important pour permettre de détecter le déclenchement de l'atteinte inflammatoire démyélinisante du cerveau, avant l'apparition de lésions en imagerie conventionnelle, et pourraient donc permettre de traiter plus tôt. En dehors des maladies génétiques de la substance blanche, ces outils d'imagerie pronostiques peuvent probablement être utilisés dans la sclérose en plaques», conclut le Pr Mochel.

»» Complémentaires à l'enregistrement de l'activité électrique du cerveau, la mesure et l'étude de la matière blanche permettront, à terme, de suivre l'état de santé général du patient et d'orienter son parcours, mais également de surveiller l'évolution des maladies et de développer de nouvelles thérapeutiques, un peu à la manière d'une «glycémie du cerveau».

L'IMAGERIE COMME ARME THÉRAPEUTIQUE

Efficace, fiable et mini-invasive, la neuroradiologie interventionnelle permet de diminuer le coût de la prise en charge du patient tout en augmentant son confort.

La neuroradiologie interventionnelle est la combinaison de l'utilisation des systèmes d'imagerie avec différents dispositifs médicaux insérés dans les artères cérébrales. Son objectif : diagnostiquer et traiter les malformations vasculaires du cerveau, de la moelle épinière ainsi que les accidents vasculaires cérébraux (AVC) ischémiques à leur phase aiguë.

La neuroradiologie interventionnelle permet d'atteindre une cible sous contrôle d'un dispositif d'imagerie utilisant les rayons X en naviguant dans les vaisseaux à l'aide d'une fine sonde. Parfois, l'abord est effectué de manière percutanée, pouvant alors utiliser l'échographie ou le scanner ; cette procédure évite l'intervention chirurgicale au niveau de la boîte crânienne. Divers implants sont ensuite disponibles pour traiter la malformation vasculaire du système nerveux.

Un peu d'histoire

L'histoire de la radiologie interventionnelle commence en 1963 lorsque le radiologue américain Charles Dotter montre qu'un cathéter introduit dans le système vasculaire peut constituer une solution thérapeutique et non plus seulement un acte à visée diagnostique. Fruit d'une collaboration entre

neurochirurgiens et neuroradiologues, la neuroradiologie interventionnelle apparaît dix ans plus tard avec les premières embolisations vasculaires sous angiographie réalisées par le Français René Djindjian et l'Américain Sidney Wallace.

En offrant une alternative à la neurochirurgie, qui nécessite une ouverture du crâne, cette pratique révolutionne la discipline. Elle devient d'autant plus rapidement l'un des piliers de la radiologie interventionnelle par voie endovasculaire qu'elle ne cesse de se perfectionner : la technique du stenting par cathéter apparaît en 1969, suivie par les premières occlusions par coils dans les années 1970. Son essor va également de pair avec le développement de l'imagerie grâce, notamment, à l'invention du scanner, de l'échographie et de l'IRM qui ont permis d'améliorer considérablement le guidage des praticiens.

Une spécialité à la croisée des chemins

« Comme tout organe, le système nerveux avait, traditionnellement, sa spécialité médicale (la neurologie) et sa spécialité chirurgicale (la neurochirurgie), explique le Pr Laurent Spelle, chef du centre NEURI de

L'hôpital Bicêtre (AP-HP), à Paris. *Mais cela a été battu en brèche par des troisièmes partenaires, les neuroradiologues interventionnels, qui utilisent l'image pour traiter et recourent à des techniques hybrides, marquant l'avènement d'une médecine moderne.*» En d'autres termes, des radiologues spécialistes du système nerveux qui utilisent les images pour traiter et non plus seulement pour diagnostiquer.

Des indications et des procédures en hausse

Depuis les années 2000, les techniques interventionnelles se sont énormément développées en France, tout comme les indications de la neuroradiologie interventionnelle. *«On a bénéficié à la fois des progrès de l'imagerie, des matériaux et des changements de concepts intellectuels,* poursuit le Pr Spelle. *Si bien que l'on traite désormais toutes les maladies des vaisseaux du cerveau par voie endovasculaire car elles nécessitent toutes de boucher ou déboucher des vaisseaux.»*

Coil, stent, flow diverter, dispositif intra-sacculaire, thrombectomie[®] mécanique... L'arsenal désormais à disposition des neuroradiologues permet une

nette augmentation du nombre de procédures. *«On utilise également des matériaux et des dispositifs qui existent déjà mais dans des nouvelles approches et des nouveaux concepts,* relate le Pr Spelle. *C'est le cas, par exemple, pour le traitement par stenting veineux des acouphènes et de l'hypertension intracrânienne.»*

41 791

Chiffre clé

C'est le nombre d'interventions, diagnostiques et thérapeutiques, endovasculaires en neuro-radiologie interventionnelle réalisées en 2024, soit 19% de plus que l'année précédente.

Source: *Journal de neuroradiologie*, 2025.

L'EMBO- LISATION, ALTERNATIVE À LA CHIRURGIE OUVERTE

La technique d'embolisation consiste à obstruer une artère en lui injectant un produit ou un dispositif, afin d'empêcher un dysfonctionnement ou la prolifération d'une pathologie.



DE LA THÉORIE...

On appelle anévrisme intracrânien une malformation des vaisseaux cérébraux, caractérisée par un renflement ou une dilation d'une artère du cerveau. S'ils peuvent être fusiformes[®] ou *blister like*[®], la majorité des anévrismes est sacculaire.

Non traités, les anévrismes cérébraux provoquent un accident vasculaire cérébral (AVC), nécessitant une prise en charge rapide. La principale est l'embolisation (ou traitement endovasculaire), alternative à la chirurgie ouverte. Cette technique peut également être utilisée pour traiter d'autres pathologies vasculaires complexes comme les malformations artérioveineuses (MAV) ou les fistules durales.

À LA PRATIQUE

Dans le cas des anévrismes cérébraux, « l'objectif de l'embolisation consiste à exclure l'anévrisme de la circulation en implantant du matériel métallique dans le sac anévrisimal ou dans le vaisseau au niveau de son collet afin d'empêcher l'afflux du sang dans le sac et permettre sa cicatrisation », explique

le Pr Sébastien Soize, neuroradiologue au CHU de Reims. En d'autres termes, il s'agit d'abord de créer une thrombose pour rendre possible la croissance d'un nouvel endothélium sur l'implant.

Il existe aujourd'hui une large gamme d'implants d'embolisation – coils, stents, flow diverter, flow disruptor (*lire sur ce sujet les chapitres suivants*) –, offrant une grande adaptabilité selon la pathologie et le profil du patient, mais aussi selon les préférences et habitudes du praticien.

En ce qui concerne les MAV et les fistules durales, « l'objectif reste de boucher la malformation, cette fois en utilisant des agents d'embolisation liquide, poursuit le Pr Soize. Il s'agit de dérivés médicaux sous forme de colles (cyanoacrylate[®], dérivés du vinyle...) ayant une viscosité et une polymérisation (temps de séchage) différentes selon les besoins ».

UNE HISTOIRE D'INNOVATION

La technique d'embolisation était déjà utilisée aux débuts de la neurochirurgie, dans les années 1930, époque à laquelle on recourait à du muscle, de la graisse ou des morceaux de *fascia lata* >>>

»»» (large bande fibreuse). Mais c'est l'essor de la radiologie interventionnelle dans les années 1970 qui marque un réel tournant.

Après avoir utilisé des caillots sanguins autologues (cellules, tissus) pour traiter les malformations artérioveineuses spinales, puis la soie et la dure mère comme agents embolisants chez des patients que l'on ne pouvait traiter avec la chirurgie, des nouveaux types d'agents d'occlusion font leur apparition : particules d'alcool polyvinyle (PVA), colles, spires (coils) et plugs.

Depuis les années 2000, les progrès des implants endovasculaires et des microcathéters, couplés à ceux des techniques mini-invasives et de l'imagerie, ont permis le développement considérable de la neuroradiologie interventionnelle. Ce traitement des malformations vasculaires du cerveau

grâce aux systèmes d'imagerie a supplanté le traitement neurochirurgical classique pour de nombreux cas et est devenu une spécialité clinique à part entière.

Des progrès qui profitent aux professionnels de santé comme aux patients

Aujourd'hui, « *les professionnels de santé disposent d'une large gamme de dispositifs qui leur permettent de traiter plus d'anévrismes de différents types*, explique le D^r Grégory Gascoü, neuroradiologue au CHU de Montpellier. Grâce à ces techniques mini-invasives, on traite désormais des anévrismes complexes, considérés auparavant comme non traitables ».

Pour les professionnels de santé, « *les innovations apportées aux techniques d'embolisation ont apporté des gains en termes d'efficacité et de sécurité et une réduction des temps de procédures*. On sait, par exemple, qu'un petit anévrisme est traité par coils ou DM intra-sacculaires ; un large ou un géant, par flow diverter », poursuit le spécialiste.

Conséquences pour les patients : une meilleure qualité de vie, une diminution du stress pré-opératoire, des durées d'hospitalisation réduites et une récupération post-opératoire plus rapide. « *Les bénéfices sont également flagrants en termes de durabilité et de prévention de la récurrence*, complète le D^r Soize. Par exemple, grâce au flow diverter, on peut traiter tout un segment d'artère et pas seulement l'anévrisme. En effet, la paroi du vaisseau

située à proximité de l'anévrisme est parfois vulnérable : si elle est recouverte, il y a moins de chance qu'elle dégénère dans le futur. »

Vers toujours plus de biocompatibilité

Si les techniques d'embolisation font aujourd'hui preuve d'un haut degré de maturité et de fiabilité, la quête d'amélioration ne s'arrête pas pour autant. « *Même si le niveau de sécurité atteint est déjà excellent et que les risques ne cessent de diminuer depuis trois décennies, il est toujours possible d'aller plus loin* », explique le D^r Soize, pour qui « *il faut continuer à développer des matériaux innovants en termes de biocompatibilité et de cicatrisation (biodégradables par exemple), mais aussi de durabilité dans la mesure où nous sommes amenés à traiter des patients de plus en plus nombreux et de plus en plus jeunes* ».

Les industriels conduisent également des recherches sur le revêtement de surface des implants afin de diminuer, voire d'éviter à terme le recours aux traitements antiplaquettaires, qui représente un frein à la prise en charge des anévrismes d'urgence. D'autres pistes portent sur des dispositifs médicaux (DM) dont la forme se modifierait au fil du temps afin de se conformer et de s'adapter à la forme de l'anévrisme. « *Néanmoins, en tout état de cause, le but de toutes ces recherches est le même : une occlusion qui soit complète, immédiate, sans risque et avec une stabilité dans le temps* », résume le D^r Gascoü.

AVC hémorragique vs. ischémique

Dans 80% des cas, l'AVC est dû à un arrêt de la circulation du sang en raison d'un caillot qui bouche une artère cérébrale. C'est ce que l'on appelle un AVC ischémique (ou infarctus cérébral). Les AVC hémorragiques sont dus, pour leur part, à la rupture d'une artère cérébrale, provoquant un saignement dans le cerveau.

Années
1930

Début de la
neurochirurgie

Années
1970

Essor de la radiologie
interventionnelle

Années
2000

Démocratisation des
implants et des techniques
endovasculaires



L'IA au service d'une approche encore plus personnalisée

Enfin, le numérique en santé et l'intelligence artificielle ouvrent un vaste champ des possibles pour la décision thérapeutique, même si cela reste, pour l'heure, à prendre au conditionnel – comme le pointe le D^r Gasco: «*L'accumulation de données de santé (imagerie, biomarqueurs, caractéristiques du patient, facteurs environnementaux...) couplée à l'intelligence artificielle laisse penser que l'on pourra prévoir, dans un futur pas si lointain, l'évolution des anévrismes. Cela offrirait la possibilité de prédire une rupture ou non de l'anévrisme, et donc, dans certains cas, d'éviter le risque d'une intervention aux patients pour qui cela n'est pas nécessaire.*»

L'IA et le big data pourraient également permettre de comparer des anévrismes, et donc de choisir le DM d'embolisation le plus adapté selon le patient. Enfin, une autre perspective porte sur l'impression de dispositifs sur mesure grâce aux données d'imagerie. «*Aujourd'hui, on peut déjà faire de l'embolisation training mais cela reste onéreux et nécessite que les industriels fournissent les DM. Il faudrait pouvoir faire cette étape de simulation entièrement de manière numérique*», conclut le D^r Gasco.

122 422

Chiffre clé

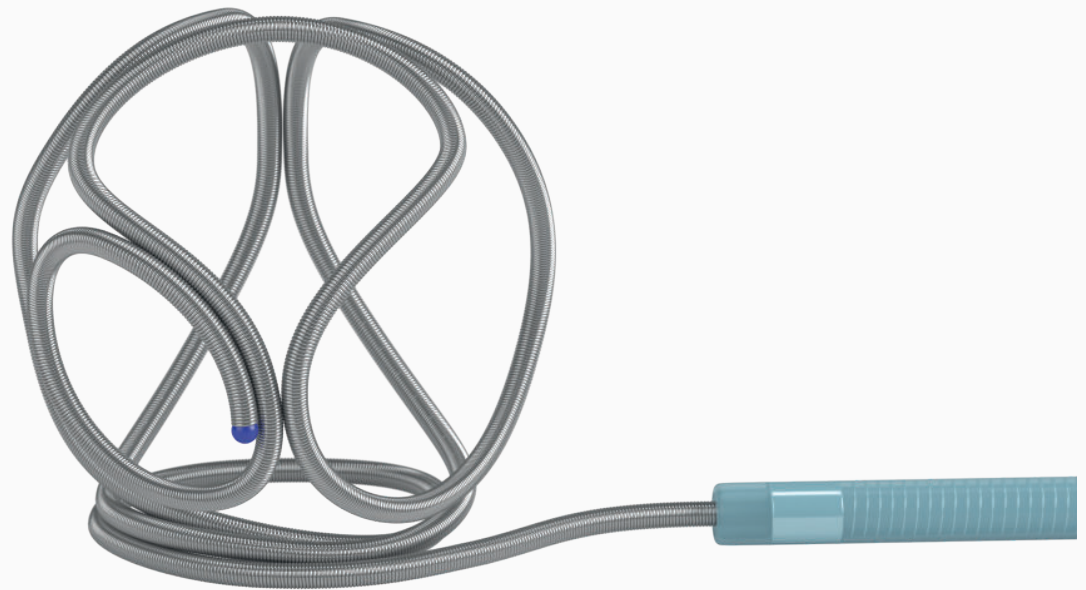
C'est le nombre d'adultes hospitalisés pour un AVC, en France, en 2022.

Source: «Épidémiologie des maladies cardiovasculaires en France», BEH hors-série, mars 2025.

COILS

COILS: UNE TECHNIQUE FIABLE ET SÛRE CONTRE LES ANÉVRISMES

Apparue dans les années 1980-90, la pose de coil, petit implant métallique permettant de remplir les anévrismes cérébraux, s'impose désormais face à la chirurgie.



DE LA THÉORIE...

Les coils sont des spires en métal très souple à mémoire de forme – du platine le plus souvent. Une occlusion endovasculaire par coil est pratiquée pour traiter les anévrismes cérébraux, principalement ceux à collet étroit.

« Comme toute intervention, cette procédure comporte des risques, le principal étant celui d'un AVC – ischémique ou hémorragique – pendant l'intervention, explique le D^r Grégory Gasco, neuroradiologue au CHU de Montpellier. Il est donc nécessaire de faire une balance bénéfice-risque pour chaque intervention. Dans le cas où l'embolisation n'est pas réalisable, on recourt soit à la chirurgie soit à l'abstention avec surveillance, laquelle est réalisée par une IRM annuelle pour évaluer les changements

de forme et de taille de l'anévrisme. S'il se modifie, cela induit une fragilité significative de la paroi et donc le risque de rupture est revu à la hausse. »

À LA PRATIQUE

La technique de coiling consiste à obstruer complètement le sac anévrismal par l'intérieur en y introduisant un ou plusieurs coils, choisis selon la taille et la forme de l'anévrisme: « On passe par l'artère radiale ou fémorale et l'on fait passer un micro-cathéter jusqu'à l'anévrisme en se guidant à l'aide des rayons X, explique le D^r Gasco. L'intervention est réalisée sous anesthésie généralisée dans une salle d'angiographie. Cette technique présente l'avantage d'être mini-invasive et de ne pas laisser de cicatrice. »

Années

1980

1990

1992

2002

Coils à
détachement
libreCoils à
détachement
contrôlé
électrolytiqueEntrée des coils
dans la pratique
couranteSupériorité
reconnue du coiling
sur la chirurgie

Les coils s'enroulent autour d'eux-mêmes pour compléter le volume anévrismal et empêcher ainsi le flux sanguin de rentrer dans l'anévrisme. Ce dispositif a une capacité thrombogène qui va amorcer la thrombose puis la cicatrisation, mais nécessite une anticoagulation efficace afin d'éviter la formation de thrombus (caillot) lors des actes endovasculaires.

UNE HISTOIRE D'INNOVATION

Historiquement, les premiers coils, à détachement libre, apparaissent dans les années 1980, suivis par les coils à détachement contrôlé électrolytique ⑥ à partir de 1990, entrés dans la pratique courante dès 1992. Leur apparition marque une véritable révolution dans la prise en charge des anévrismes. «Auparavant, on utilisait des ballons d'occlusion, mais il a été rapidement montré que non seulement ils n'étaient pas efficaces, mais qu'ils étaient sources de complications», relate le Dr Gascou. Ils sont aujourd'hui indispensables dans la prise en charge des anévrismes, en complément comme en première intention.

Une quête d'amélioration

Ces dix dernières années, les coils n'ont cessé de s'améliorer : ils sont plus souples et offrent une large gamme de tailles, calibres et diamètres. «Les industriels ont aujourd'hui mis au point des coils de plus grosse taille. Auparavant, cette piste n'était pas couronnée de succès car ils avaient des propriétés mécaniques différentes, ce qui pouvait entraîner des difficultés de pose. Cela semble se résoudre désormais avec le développement de spires de grande taille mais souples, avec des propriétés identiques aux anciennes générations en termes de pose mais présentant un meilleur taux de remplissage ; et donc des résultats, semble-t-il, meilleurs à long terme», explique le Pr Sébastien Soize, neuroradiologue au CHU de Reims.

Diversifier les matériaux

Côté matériaux, ces dispositifs sont le plus souvent en platine – un matériau très radio-opaque, souple et malléable, ce qui n'induit pas de risque de perforation de l'anévrisme. «À partir de 2022-

2023 est apparu le nitinol, un alliage de titane et de nickel, que l'on ajoute aux coils pour augmenter la surface de platine, dans cette optique de prendre toujours plus de place dans l'anévrisme», explique le Dr Gascou.

Plus récemment, on a vu apparaître des dispositifs recouverts d'hydrogel : «Sur ces hydrocoils, le gel gonfle progressivement au contact du sang, explique le Pr Soize. En effet, le problème est que l'on ne peut remplir qu'environ 35% du volume de l'anévrisme avec les spires. Le reste du volume est occupé par de la thrombose. Ces hydrocoils qui gonflent permettent de prendre jusqu'aux deux tiers du volume, d'augmenter le taux de remplissage et donc d'améliorer l'efficacité à long terme.» À noter que d'autres revêtements (notamment des bio-actifs qui permettent d'activer certaines voies de l'inflammation pour stimuler les tissus cicatriciels autour des coils) sont également testés.

Une nécessaire complémentarité

Depuis 2002, «le coiling a montré sa supériorité en termes de sécurité par rapport à la chirurgie, pointe le Pr Soize. En termes d'efficacité, en revanche, même si elle est d'un très bon niveau, elle présente un talon d'Achille – un risque de recanalisation, et donc de devoir faire un second traitement. Cela peut concerner 10 à 20% des patients selon les séries». Et c'est là que les autres dispositifs d'embolisation que sont le stent, le flow diverter et le flow disruptor, prennent toute leur importance.

STENTS

D'UNE TECHNIQUE ADJUVANTE À UN DISPOSITIF INCONTOUR- NABLE

Initialement utilisés comme technique adjuvante aux coils pour traiter les anévrismes à large collet, les stents ont connu diverses améliorations, les faisant devenir incontournables dans l'arsenal thérapeutique de la neuroradiologie interventionnelle.



DE LA THÉORIE...

Le stent est un petit dispositif métallique et cylindrique ressemblant à un ressort, placé dans une artère cérébrale. Initialement développés en cardiologie interventionnelle pour rouvrir des artères rétrécies et ainsi assurer une bonne circulation du sang, ils ont été largement modifiés pour leur utilisation dans la circulation cérébrale. Au lieu d'utiliser des stents montés sur des ballons, dont la navigation est presque impossible vers la circulation cérébrale, les ingénieurs ont développé des stents « auto-expansibles » dans un matériau à mémoire de forme, le nitinol. Ces stents sont soit tressés, soit découpés au laser. Il en existe plusieurs sortes : stents conventionnels, stentriever, flow diverters ou flow disruptors (*lire à ce sujet les chapitres suivants*).

À LA PRATIQUE

On recourt aux stents conventionnels pour traiter les anévrismes cérébraux à collet large : ils permettent de maintenir les coils dans le sac anévrysmal et agissent comme support à la néoendothélisation®.

UNE HISTOIRE D'INNOVATION

« Pendant très longtemps, on ne parvenait pas à traiter les AVC ischémiques®, soit 80% des AVC, rappelle en préambule le Pr Laurent Spelle, chef du centre NEURI de l'hôpital Bicêtre (AP-HP), à Paris. La seule façon de les prendre en charge consistait à infuser dans une veine du bras du patient un médicament fibrinolytique, espérant qu'il atteigne le caillot et le dissolve. » Une technique cependant très limitante car elle nécessite d'injecter le médicament très rapidement – au plus tard 4h30 après le début des symptômes –, sans quoi il risquait d'être inefficace voire de créer des saignements. « Il fallait donc emmener ce dernier à l'hôpital, faire le bilan et démarrer la perfusion au maximum dans les 4h30 », poursuit le Pr Spelle.

Associer les coils et les stents

Après les avancées majeures apportées par les coils dans les années 1990, l'arrivée de stents intracrâniens au début des années 2000 marque une nouvelle révolution. Contrairement aux stents

Début des années

2000

Apparition
des stents
intracrâniens

2008-09

Apparition des stents
retrievers

2010

Stents intracrâniens
pour les anévrismes
à large collet

Depuis

2010

Travail sur le revêtement
de surface des stents

coronaires qui sont déployés dans les artères à l'aide d'un cathéter à ballon, ces endoprothèses vasculaires, qui ne mesurent que quelques millimètres, sont plus souples et auto-expansibles. Autrement dit, on les fait coulisser à l'intérieur d'un cathéter et elles se déploient automatiquement à leur sortie du dispositif. Dès 2003, ces stents commencent à être adoptés pour faire tenir les coils à l'intérieur de l'anévrisme.

Le stent retriever, aux fondements de la thrombectomie mécanique

En 2008, un autre pas est franchi : « Au cours d'une intervention complexe sur une patiente victime d'une AVC ischémique aigu, le neuroradiologue interventionnel se retrouve contraint de devoir retirer sous aspiration continue le stent posé quelques minutes auparavant, raconte le Pr Spelle. Une fois sorti, il découvre un thrombus emprisonné dans le stent ! » Le stent retriever est né. « Si cela se propage dès 2009, son efficacité n'est pas encore prouvée, tempère le Pr Spelle. Des études randomisées démarrent

alors à divers endroits du globe pour comparer des cohortes traitées par fibrinolyse seule, et d'autres par fibrinolyse et retrait du caillot. C'est la mise au point d'une nouvelle procédure, la thrombectomie mécanique. » (lire à ce sujet le chapitre dédié page 37)

Traiter les anévrismes à large collet

Parallèlement, un nouveau stent intracrânien est commercialisé aux États-Unis et en Europe en 2010. Celui-ci permet de traiter les anévrismes intracérébraux à large collet en complément de coils. Flexible et très stable pour s'adapter à la tortuosité de l'anatomie cérébrale, ce dispositif peut être placé par un seul praticien, et ainsi simplifier les procédures neurovasculaires complexes.

Vers une diminution des antiplaquettaires

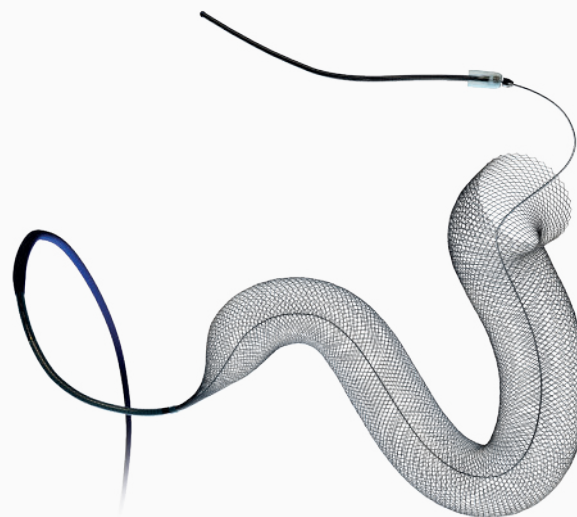
Depuis, les stents ont connu des améliorations continues : « Il y a eu notamment des travaux menés sur le nombre de brins et leur densité, explique le

D^r Michel Piotin, chef du service de neuroradiologie interventionnelle de l'Hôpital Fondation Rothschild. On s'aperçoit, cependant, que si les brins sont de plus en plus denses, ils sont également de plus en plus thrombogènes. »

En effet, la pose d'un stent peut entraîner un ralentissement du flux sanguin au niveau de la surface du dispositif, augmentant le risque de thrombose. « C'est pourquoi certains stents de dernière génération sont dotés d'un traitement de surface à base de polymères, permettant de lutter contre les phénomènes thrombotiques, poursuit le D^r Piotin. Mais leur efficacité reste difficile à apprécier puisque, pour ce faire, il faudrait que l'on diminue le traitement médical antiplaquettaire qui va de pair. À ce jour, aucune étude randomisée n'a été faite en ce sens. Mais il ne fait aucun doute que ce sont sur ces stents de moins en moins thrombogènes, permettant de se passer des antiagrégants plaquettaires – ou, tout du moins, de n'en laisser qu'un – que porteront, dans un futur proche, les innovations. »

POUR UNE APPROCHE DE PLUS EN PLUS PERSON- NALISÉE

Depuis le milieu des années 2000, les stents flow diverters et flow disruptors – dispositifs intrasacculaires – sont venus élargir la gamme des instruments à disposition des neuroradiologues interventionnels. Conséquence : un spectre d'anévrismes intracrâniens pris en charge toujours plus large.



DE LA THÉORIE...

Les stents intracrâniens de type flow diverter sont indiqués pour traiter les anévrismes de grande taille à large collet pour lesquels les coils ne sont pas efficaces. On s'en sert aussi pour traiter plusieurs anévrismes situés côté à côté sur un même vaisseau, ce qui permet d'avoir recours à un seul dispositif au cours d'une seule procédure. On l'utilise encore pour les anévrismes fusiformes^⑥, et même, désormais, dans certains cas pour les anévrismes dits de bifurcation que l'on trouve à l'embranchement de deux vaisseaux (à la manière d'un V), là encore en recourant à un unique stent au lieu de deux dans la technique du « Y stenting ».

Les dispositifs intrasacculaires de type flow disruptor sont, quant à eux, principalement dédiés aux anévrismes de bifurcation à collet large. « L'un et l'autre sont des dispositifs plus facilement navigables

et positionnables, offrant des temps d'intervention raccourcis, donc une plus grande sécurité pour le patient », explique le Pr Sébastien Soize, neuroradiologue au CHU de Reims.

À LA PRATIQUE

« Les flows diverters sont des stents dotés d'un maillage serré qui permet de provoquer une déviation du flux sanguin pour en diminuer l'arrivée dans la poche anévrismale », explique le Dr Michel Piotin, chef du service de neuroradiologie interventionnelle de l'Hôpital Fondation Rothschild. « Ce DM est apposé sur les parois de l'artère porteuse, au niveau du collet de l'anévrisme, et le sang passe dans ses mailles, dans l'anévrisme, de manière très ralentie, permettant sa stagnation et donc, la formation du thrombus intra-anévrismal », complète le Dr Grégory Gascou, neuroradiologue au CHU

Deuxième moitié des années

2000

Apparition des flows diverters

Début des années

2010

Apparition des flows disruptors



3

Chiffre clé

Les stents flows diverters présentent un maillage environ 3 fois plus dense que les stents intracrâniens conventionnels.

Source: ANSM, 2018.

de Montpellier. « Les flows diverters comportent plus de brins que les stents traditionnels (entre 48 et 64), offrant par leur maillage très serré une couverture métallique plus importante », précise le Pr Soize.

Les flows disruptors ont eux aussi pour mission de créer un détournement de flux, essentiellement pour les anévrismes de bifurcation. Mais, au lieu d'ouvrir le stent dans l'artère porteuse de l'anévrisme, le dispositif est déployé dans le sac anévrysmal. En lieu et place de plusieurs coils, cet unique DM remplit complètement l'anévrisme. Or, face à l'urgence que représente un anévrisme rompu, la pose d'un seul dispositif représente un gain de temps inestimable. Autre avantage de taille en cas d'AVC hémorragique: le flow disruptor permet d'éviter le traitement antiplaquettaire dans l'immense majorité des cas pour les anévrismes de bifurcation (en Y).

Côté matériaux, le nitinol (nickel-titane) tend à remplacer, en raison de ses propriétés mécaniques, les alliages de nickel-chrome ou de chrome-cobalt, utilisés jusqu'alors.

UNE HISTOIRE D'INNOVATION

C'est dans la deuxième moitié des années 2000 que les stents à diversion de flux (flow diverter) font leur apparition. Ils sont suivis, au début des années 2010, des dispositifs à disruption de flux (flow disruptor ou cage intra-anévrysmale), notamment au CHU de Reims, un établissement pionnier de cette technique. Ce dispositif marque une >>>

Un traitement anti- agrégant plaquettaire, pour quoi faire ?

La pose d'un stent introduit un matériau étranger dans l'artère, ce qui peut activer les plaquettes et favoriser leur agrégation. Cette agrégation plaquettaire correspond à une étape essentielle de l'hémostase primaire, normalement destinée à colmater une lésion vasculaire. Lorsqu'elle survient de manière inappropriée, elle peut conduire à la formation d'un thrombus susceptible d'obstruer l'artère, entraînant un accident ischémique cérébral. Pour limiter ce risque, une double anti-agrégation plaquettaire est généralement prescrite pendant plusieurs mois après l'intervention, suivie chez certains patients d'un traitement antiplaquettaire au long cours.

»» avancée de taille pour traiter les anévrismes de bifurcation à collet large. Ces minuscules cages de nickel ou de nitinol tissé sont implantées directement dans la poche de l'anévrisme grâce au guidage d'un cathéter à partir de l'artère fémorale ou de l'artère radiale. Comme leur volume a été calculé en amont, elles s'adaptent parfaitement à l'anévrisme.

Pour une prise en charge de plus en plus personnalisée

Les uns et les autres poursuivent le même objectif : provoquer une thrombose au niveau de l'anévrisme. Près de deux décennies plus tard, la gamme de dispositifs disponibles n'a fait que s'élargir : « Ils reposent sur des technologies différentes et ont chacun leurs avantages et leurs inconvénients, ce qui offre aux neuroradiologues des DM de tailles, de formes et de degrés de souplesse différents », constate le Pr Soize. Résultat : on prend en charge des anévrismes de taille, de forme et de complexité différentes. Par ailleurs, ces stents peuvent aujourd'hui être délivrés via des micro-cathéters qui offrent plus de souplesse et d'agilité et donc, un geste plus sûr et une plus grande sécurité, notamment pour le déploiement du dispositif dans l'anévrisme : « Avoir tous ces dispositifs à notre portée permet de pouvoir choisir le plus adapté pour chaque anévrisme et donc de proposer aux patients un traitement de plus en plus personnalisé », poursuit le Pr Soize.

Des bénéfices augmentés par la simulation et le numérique

Aujourd'hui, la pose de dispositifs intrasacculaires est de plus en plus répandue, « non seulement parce que c'est un traitement particulièrement sûr et rapide, mais aussi parce que l'on dispose de nouveaux outils, notamment en termes de simulation, explique le Dr Plotin. Ceux-ci ont changé la donne en ce qu'ils permettent de simuler numériquement ce qui va se passer in vivo et de prédire le déploiement de la prothèse. »

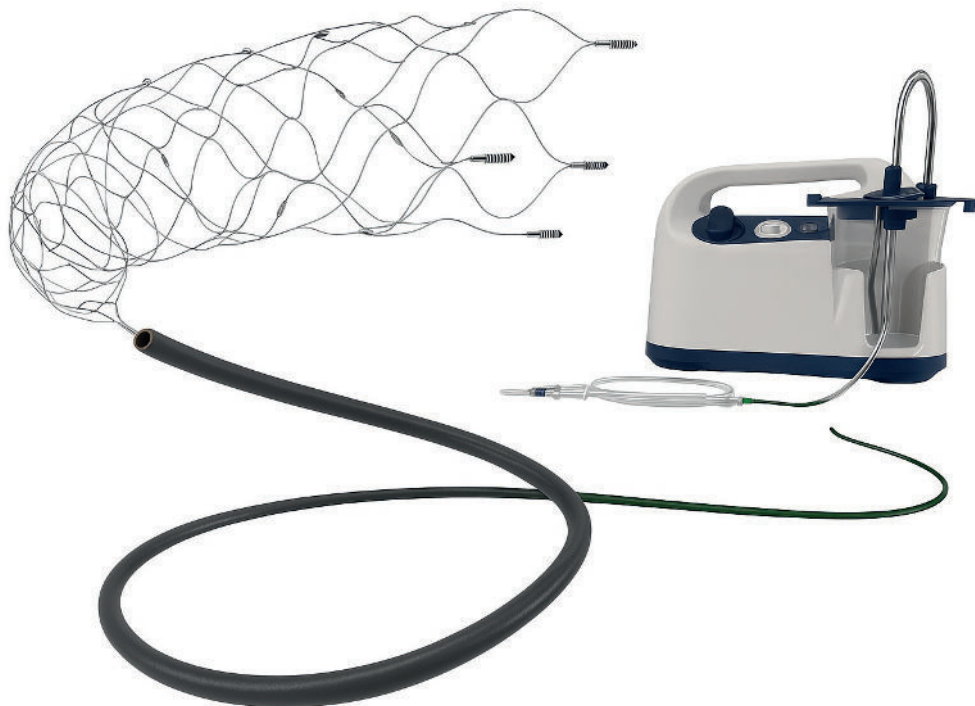
« En important les données d'imagerie du patient, on peut établir un planning thérapeutique et déterminer de manière numérique le dispositif intrasacculaire qui offrira la meilleure apposition aux parois de l'anévrisme sans déborder dans l'artère porteuse avant de le poser », corrobore le Dr Gasco. Du sur-mesure qui permet, in fine, de diminuer non seulement le temps de procédure mais également de réduire le nombre de dispositifs utilisés – lesquels sont, rappelons-le, à usage unique.



THROMBECTOMIE MÉCANIQUE

UNE INNOVATION DE RUPTURE POUR L'AVC ISCHÉMIQUE

Validée scientifiquement il y a une décennie, la thrombectomie mécanique a marqué une véritable révolution dans la prise en charge des patients victimes d'un accident vasculaire cérébral ischémique, apportant un bénéfice sans égal sur le pronostic.



DE LA THÉORIE...

Pour rappel, un accident vasculaire cérébral (AVC) ischémique[Ⓞ] est dû à un caillot de sang qui obstrue une artère cérébrale – la plupart du temps, de grosse taille –, provoquant son occlusion, si bien que l'apport en oxygène pour le cerveau devient insuffisant. De très mauvais pronostic, les AVC ischémiques[Ⓞ] représentent 80% des accidents vasculaires cérébraux. La thrombectomie[Ⓞ] mécanique consiste à déboucher l'artère.

« Plusieurs études randomisées ont montré que cette technique apporte un bénéfice considérable

en termes de récupération, avec un ratio de trois patients à traiter pour en sauver un, pointe le Pr Hubert Desal, chef du service de neuroradiologie diagnostique et interventionnelle du CHU de Nantes. Très peu d'autres interventions ou médicaments montrent un résultat aussi satisfaisant. »

À LA PRATIQUE

En pratique, et en complément de la fibrinolyse[Ⓞ] chimique intraveineuse, il existe trois techniques endovasculaires intra-artérielles : par stenting, par cathéter d'aspiration ou par combinaison des >>>

Des structures dédiées à la prise en charge de l'AVC

Le plan d'actions national AVC 2010-2014 avait pour objectif de structurer l'organisation territoriale de la prise en charge rapide et qualité de l'AVC. Pour cela, des unités de soins intensifs neuro-vasculaires (UNSV) ont été déployées sur le territoire. On en compte environ 140 en France aujourd'hui. Cependant, la thrombectomie mécanique ne peut être réalisée que dans des centres spécifiques, dotés d'un plateau technique adapté. Actuellement, les centres de mention B, agréés pour l'ensemble des procédures de neuroradiologie interventionnelle (dont la thrombectomie mécanique), sont au nombre de 39. On en dénombre 17 de mention A, accrédités spécifiquement pour la prise en charge de l'AVC.

»»» deux. Le choix de la technique et du protocole est déterminé par l'équipe médicale en fonction de plusieurs critères : les habitudes de l'établissement, le matériel, l'aisance du neuroradiologue interventionnel envers telle ou telle technique, ou encore les spécificités du patient (anatomie, localisation du caillot).

« La première méthode consiste à passer par l'artère fémorale pour venir déployer dans le caillot, sous contrôle radioscopique et à l'aide d'un cathéter, un stent retriever, décrit le Pr Desal. Cette petite cage métallique, maintenue attachée par un fil, va capturer le thrombus que l'on fait sortir en tirant sur le fil. » La deuxième consiste pour sa part à aspirer le caillot via un cathéter. Quel que soit le protocole retenu, « l'intervention doit avoir lieu dans les meilleurs délais, initialement six heures après le début des symptômes – même si ce délai tend à s'élargir pour certaines catégories de patients », précise le Pr Desal.

UNE HISTOIRE D'INNOVATION

« En neuroradiologie interventionnelle, on a toujours su déboucher les artères et retirer un caillot, mais ce n'était pas validé, rappelle le Pr Desal. Le traitement de référence était donc la fibrinolyse intraveineuse, laquelle doit être administrée dans un délai de trois à quatre heures. » Mais la mise au point du stent retriever, au cours des années 2000, bouscule les paradigmes sur l'AVC jusqu'ici en vigueur, notamment pour ce qui concerne le délai de prise en charge.

Le tournant de l'étude MR CLEAN

Mais c'est réellement la publication des résultats de l'étude randomisée « *Multicenter Randomized Clinical Trial of Endovascular Treatment in the Netherlands* » (MR CLEAN), dans le *New England Journal of Medicine* en janvier 2015, qui marque une révolution. Celle-ci démontre, pour la première fois, la nette supériorité d'un traitement par thrombectomie mécanique intra-artérielle associée à une thrombolyse intraveineuse par rapport au traitement de référence.

Jusqu'alors, on ne pratiquait la thrombectomie mécanique qu'en recours, si la thrombolyse ne fonctionnait pas. MR CLEAN met en évidence sans nul doute possible la valeur ajoutée de la thrombectomie mécanique. La nouvelle se répand comme une trainée de poudre, corroborée par la publication d'une demi-douzaine d'autres études dans les mois suivants, toutes allant dans le même sens. Autre bénéfice de taille : là où la fibrinolyse doit être administrée très rapidement, la thrombectomie mécanique peut être réalisée dans les six heures, ce qui élargit la fenêtre temporelle de traitement.

Repousser les limites

Une fenêtre depuis revue à la hausse, comme le rappelle le Pr Desal : « Le bénéfice peut aller jusqu'à vingt-quatre heures selon les patients. On maîtrise parfaitement l'imagerie cérébrale avec les biomar-

2008-09

Apparition
des stents retrievers

2010-14

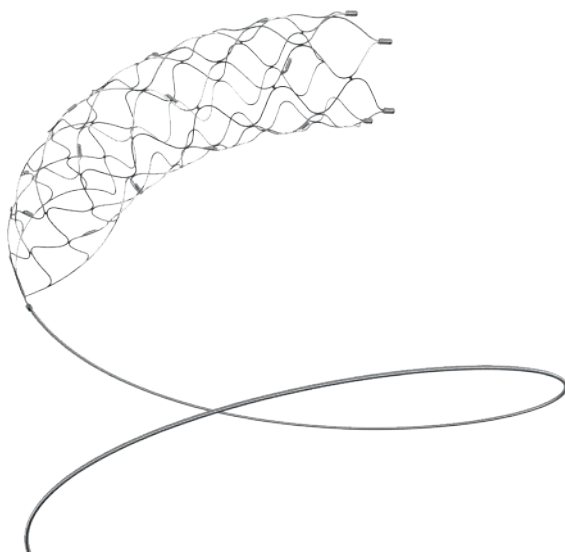
Plan d'actions national AVC
(accident vasculaire cérébral)

2015

Publication de l'étude
MR CLEAN

2017

Création de l'acte
de thrombectomie
mécanique



queurs, si bien que certains patients peuvent en bénéficier même très tardivement. Au départ, avec la fibrinolyse [Ⓞ], on s'abstenait si le cerveau avait souffert sur plus d'un tiers. Aujourd'hui, on peut y procéder même si l'AVC ischémique est très étendu. » Le stenting et l'aspiration faisant preuve à ce jour d'un degré similaire d'efficacité, ce sont bien le temps de prise en charge ainsi que le score de revascularisation (TICI) qui permettent d'évaluer la revascularisation au premier passage de ces techniques.

Toujours est-il que, quelle que soit la technique (voire les techniques en cas de combinaison du stenting et de l'aspiration), les bénéfices sont indéniables : score de revascularisation plus important, amélioration de la prise en charge et de la qualité de vie, diminution du handicap, augmentation du nombre de retours à domicile, etc. En outre, « l'AVC étant la première cause de handicap acquis, la première cause de mortalité chez les femmes et la deuxième cause de démence, l'apport de la thrombectomie [Ⓞ] mécanique est évidemment significatif sur le plan médico-économique », souligne le Pr Desal. >>>

+1
million

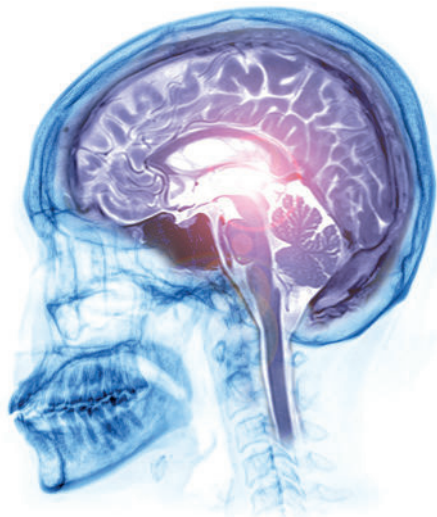
Chiffre clé

C'est le nombre de personnes, au 1er janvier 2023, qui vivaient en France en ayant eu un AVC dans leur passé.

Source: BEH Hors-série, 4 mars 2025, cité par l'Assurance maladie.

Le bon geste chez le bon patient

Ce qui n'empêche pas une certaine marge de progression, comme le rappelle le Pr Desal : « *Malgré une efficacité de plus de 80% sur le plan technique, certaines occlusions nous résistent encore. Ainsi, en dépit d'une reperfusion du cerveau, il arrive que certains patients ne récupèrent pas pour autant. On essaie d'analyser pour en comprendre la raison et*



d'être pertinent dans l'indication de l'intervention, cette dernière n'étant pas forcément nécessaire. Cela reste une procédure coûteuse, il faut donc qu'il y ait un bénéfice. En un mot, le bon geste chez le bon patient. »

Un enjeu de couverture du territoire

Validée scientifiquement dès 2015, la création de l'acte survient deux ans plus tard. Mais cette nouvelle approche, qui reste une procédure d'urgence, nécessite également de former et de recruter des professionnels de santé dédiés (neuroradiologues interventionnels, anesthésistes, infirmiers anesthésistes, manipulateurs radios) et de mettre en place des blocs opératoires adaptés accessibles sans délai. « *La répartition des centres de neuroradiologie interventionnelle étant inégale, un gros travail de couverture du territoire a donc été mené pour rapprocher cette technique de la population, explique le Pr Desal. Aujourd'hui, plus de cinquante centres hospitaliers peuvent offrir une activité de prise en charge de l'AVC dans ses formes graves. »*

Une nécessaire valorisation

Demeure cependant une véritable problématique sur le plan des ressources humaines. Rappelant que « *la prise en charge de l'AVC est une activité de l'urgence absolue, les deux tiers ayant lieu en nuit profonde, le week-end et les jours fériés* », le Pr Desal en souligne l'aspect particulièrement

De l'importance de l'imagerie

Seul un examen d'imagerie permet de déterminer s'il s'agit d'un AVC hémorragique **G** ou d'un AVC ischémique **G**. Traditionnellement, en France, on recourt à l'IRM même si le scanner peut également être utilisé. C'est cet examen d'imagerie qui permettra de définir le protocole et la technique à adopter.

astreignant. « *L'ensemble des professionnels – neuroradiologues, manipulateurs, anesthésistes – doivent se mobiliser extrêmement rapidement. Cela épuise les équipes et beaucoup quittent le métier pour cette raison car cela a un impact sur la qualité de vie des soignants. »*

Il est donc essentiel, pour le Pr Desal, de valoriser davantage ces professionnels et leur niveau d'expertise et de finesse technique. « *Il faut non seulement avoir conscience de leur rôle mais augmenter leur nombre. En cela, la création de l'École nationale de la thrombectomie **G** il y a une dizaine d'années a été très structurante car elle permet de réunir et de former les étudiants, d'apprendre les bases théoriques, de réaliser des ateliers de simulation pour se familiariser avec les gestes, etc. Mais il faut aller plus loin. »*

HÉMATOME SOUS DURAL CHRONIQUE

TRAITER UNE PATHOLOGIE DE PLUS EN PLUS FRÉQUENTE

Si le traitement de référence de l'hématome sous-dural chronique a été pendant longtemps la chirurgie, l'embolisation de l'artère méningée moyenne par voie endovasculaire émerge depuis quelques années comme une voie mini-invasive alternative, notamment pour prévenir une éventuelle récurrence.

DE LA THÉORIE...

Un hématome sous-dural se développe autour du cerveau, entre la dure-mère et l'arachnoïde. « *Les hématomes se collectent et se chronicisent, formant une hémorragie sous-durale chronique. Fréquent chez les patients âgés sous traitement antithrombotique ou sous anticoagulants, par exemple, l'hématome sous-dural chronique est favorisé par les chutes*, explique le Pr Frédéric Clarençon, chef d'unité fonctionnelle dans le service de neuroradiologie interventionnelle à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière (AP-HP), à Paris. *L'hémorragie sous-durale chronique peut s'avérer fatale. Lorsque la collection d'hématomes est importante, elle comprime le cerveau ce qui peut entraîner un déficit neurologique. La plupart du temps, une opération chirurgicale est nécessaire.* »

À LA PRATIQUE

On distingue deux principaux cas de figure, détaille le Pr Clarençon : « *Soit l'hématome est bien toléré et les symptômes sont mineurs. En ce cas, l'évacuation de l'hématome n'est pas obligatoire et on réalise uniquement une embolisation. La plupart du temps, il y a résorption. Pour les patients les plus graves, en revanche, il faut intervenir chirurgicalement dans un premier temps pour lever l'effet de masse puis, quelques jours après, procéder à l'embolisation.* » Pour éviter la récurrence, « *on embolise via l'artère méningée moyenne en recourant à des agents emboliques (particules ou liquides) pour bloquer*

les vaisseaux qui participent à l'entretien de l'hématome », poursuit le Pr Clarençon. L'objectif étant de dévasculariser au maximum la dure-mère en pénétrant le plus loin possible dans les vaisseaux qui l'alimentent, les agents emboliques sont délivrés à partir d'un cathéter introduit généralement par voie fémorale ou radiale.

UNE HISTOIRE D'INNOVATION

« *Si l'on réalise des embolisations de l'artère méningée moyenne depuis des années, la première vraie série faisant état d'un intérêt clinique dans le traitement des hématomes sous-duraux chroniques date de 2017*, explique le Pr Clarençon. *Cette étude a montré un bénéfice sur une cohorte rétrospective comparative.* »

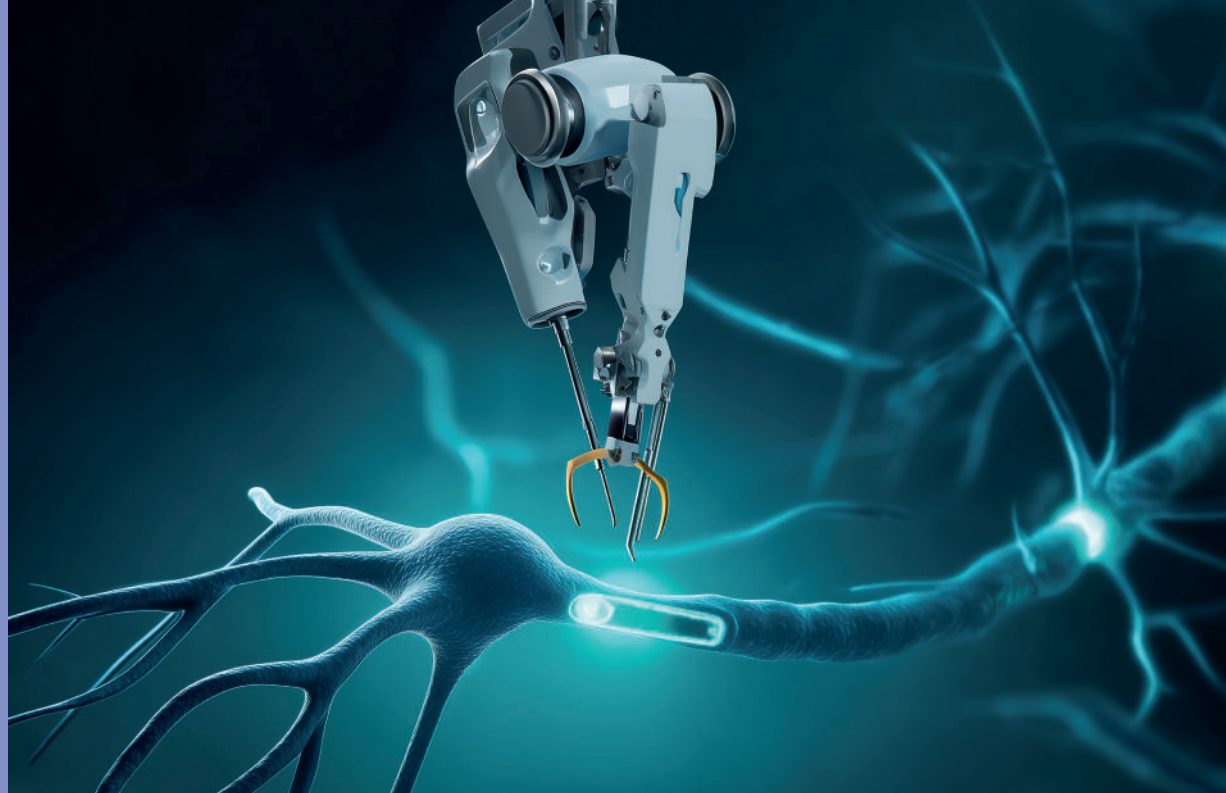
S'il existe un bénéfice potentiel de l'embolisation dans la prise en charge des hématomes sous-duraux chroniques, encore faut-il le démontrer formellement. À ce jour, quatre études randomisées de haut niveau de preuve ont été publiées, et une dizaine d'autres sont en cours, ce qui devrait déboucher sur des recommandations claires en matière de prise en charge.

« *À terme, cette pathologie très fréquente va concerner un grand nombre de patients, potentiellement 100 à 200 par an pour chaque centre de neuroradiologie interventionnelle*, prévoit le Pr Clarençon. *Il y a donc un bénéfice potentiel pour cette population âgée et fragile porteuse d'hématomes sous-duraux chroniques afin d'éviter la récurrence et la réhospitalisation.* »

SALLES HYBRIDES ET ROBOTIQUE

POUR DES DIS- POSITIFS ET DES PROCÉDURES TOUJOURS MOINS INVASIFS

Véritables concentrés de technologies, les salles hybrides bouleversent la neuroradiologie interventionnelle. À la croisée du bloc opératoire et du plateau d'imagerie, elles offrent aux équipes médicales un environnement de travail ultraperformant, conjuguant stérilité, guidage robotisé, imagerie 3D en temps réel et intelligence artificielle.



DE LA THÉORIE...

En tant que branche de la radiologie spécialisée dans les techniques et procédures mini-invasives, la neuroradiologie interventionnelle nécessite des plateaux techniques regroupant tout à la fois les caractéristiques stériles et techniques d'un bloc opératoire conventionnel et des systèmes d'imagerie et de navigation de pointe. Ces salles sont dites hybrides, dans la mesure où elles permettent de réaliser, dans un seul et même espace, des actes de radiologie

guidés par l'image et des interventions chirurgicales complexes. Elles s'avèrent donc particulièrement utiles pour le traitement des accidents vasculaires cérébraux (AVC) ischémiques[Ⓞ] par thrombectomie[Ⓞ] mécanique ainsi que des malformations vasculaires cérébrales.

À LA PRATIQUE

Les dispositifs d'imagerie présents dans les salles hybrides permettent l'acquisition d'images en 3D ainsi que la visualisation en temps réel des vais-

Années
2000

Première salle hybride
à Monaco

2010

Première salle
hybride en France

Années
2010-20

Développement des salles
hybrides



250

Chiffre clé

C'est le nombre d'unités de cardiologie et de neuroradiologie interventionnelle disposant chacune d'une salle équipée pour l'angiographie.

Source: Autorité de sûreté nucléaire, 2025.

seaux intracrâniens et cervicaux. Il s'agit d'angiographies qui sont utilisés pour planifier et contrôler la mise en place des implants endovasculaires. Le neuroradiologue peut alors déplacer le robot interventionnel au cours de l'intervention. La table d'opération est également orientable et mobile, adaptée à la chirurgie comme aux examens d'imagerie. Conséquences : moins de transferts et une sécurité accrue pour le patient, un gain de temps particulièrement précieux en contexte d'urgence, ou encore une grande précision des gestes grâce à une imagerie de pointe.

UNE HISTOIRE D'INNOVATION

C'est au centre Cardio-Thoracique de Monaco (CTM) que naissent les salles hybrides, dans les années 2000. En France, l'unité de chirurgie cardiaque de l'Hôpital privé Jacques Cartier à Massy, en Île-de-France, est la première à s'équiper de cette technologie en 2010.

La motivation est forte car ce nouveau dispositif présente des avantages nombreux et importants : une meilleure sécurité, une qualité d'image supérieure, des outils de guidage plus performants, une précision affinée, des gestes surveillés de manière plus optimale, un temps d'acquisition plus rapide, ou encore un confort de travail inédit pour le médecin et le chirurgien. En outre, grâce au ciblage précis des zones anatomiques, les doses de radiation sont diminuées de moitié. Surtout, les équipes sont en mesure de visualiser en 3D les zones opérées, de >>>

»»» reconstruire et de fusionner des images afin de vérifier en temps réel l'efficacité de leurs différents gestes sur le patient.

Performance technique et gain de temps se combinent donc tandis que l'on évite au patient l'habituel examen radiologique de contrôle. Enfin, le dispositif permet, grâce au système de vidéo-transmission (caméras et écrans), un enseignement en direct ou différé et à distance à destination de l'ensemble de l'équipe et des professionnels en formation.

Des leviers d'excellence

C'est pourquoi les salles hybrides sont envisagées comme des leviers d'excellence thérapeutique pour l'hôpital. À tel point que l'installation de salles hybrides connaît une progression très importante : une vingtaine de projets naissent chaque année. Cela constitue une rupture avec la salle interventionnelle d'il y a vingt ans, qui utilisait un amplificateur de brillant (aussi appelé capteur-plan) pour obtenir instantanément une

image radiologique numérique de haute définition dès la prise du cliché radiographique.

Toujours plus de précision

« Aujourd'hui, les machines peuvent faire plusieurs types d'acquisition d'images, explique le P^r Laurent Spelle, chef de service du centre NEURI de l'hôpital Bicêtre (AP-HP), à Paris. Ainsi, l'angiographie cérébrale est réalisée via une piqûre dans le pli de l'aîne ou du bras par lequel on insère un cathéter dans

FOCUS

La robotique chirurgicale au service de l'organe le plus complexe du corps humain

Si le robot a fait son entrée en neurologie dès les années 1980, la phase des pionniers a été particulièrement longue dans cette spécialité.

Toute technologie doit arriver au bon moment et à besoin de temps pour être acceptée, deux critères essentiels pour son essor. La robotique neurochirurgicale est un parfait exemple de cette indispensable conjoncture. Il a en effet fallu que les neurochirurgiens soient prêts à faire confiance à l'assistance robotique, eu égard à la délicatesse et la précision nécessaires pour la prise en charge chirurgicale des troubles du système nerveux.

En neurochirurgie stéréotaxique et fonctionnelle, le robot est utilisé pour définir dans le cerveau des trajectoires préalables à l'implantation d'électrodes, réaliser des biopsies cérébrales

opérer des tumeurs cérébrales. Une imagerie réalisée en pré-opératoire permet de planifier l'intervention en amont, de réaliser un repérage par laser, cette technologie faisant la relation entre les données d'imagerie et le patient et, donc, de positionner l'instrumentation avec une grande exactitude. Le chirurgien opère ensuite à l'aide du bras robotisé, programmé pour intervenir notamment dans des zones de sécurité définies préalablement afin de préserver entre autres les vaisseaux sanguins du patient.

Le robot agit comme un GPS, conçu pour rendre le geste chirurgical sécurisé et précis. Le

chirurgien peut alors introduire son instrument dans le crâne pour implanter ou prélever ce dont il a besoin. Tout au long de l'intervention, le chirurgien peut visualiser en temps réel ses instruments sur l'imagerie. Comme dans l'ensemble des spécialités médicales, le dispositif robotique n'agit jamais seul, demeurant sous le contrôle étroit du chirurgien : celui-ci dispose d'un retour de force qui lui permet de réaliser son geste opératoire de manière classique.

[Pour en savoir plus, lire notre livret consacré à la robotique chirurgicale]

l'artère jusqu'aux vaisseaux du cerveau, avant d'injecter un produit iodé pour réaliser les acquisitions d'imagerie. De leur côté, si l'angio-IRM et l'angioscanner présentent l'avantage de ne pas être invasifs, les résultats sont en revanche moins précis.»

En outre, l'angiographie cérébrale autorise le diagnostic et l'interventionnel, les photos des vaisseaux permettant de dresser une carte de navigation.

Digitalisation et IA

« Par ailleurs, toute la chaîne étant désormais digitale, on dispose de nombreux moyens d'imagerie, poursuit le Pr Spelle. On peut ainsi réaliser des images scanographiques avec une machine d'angiographie. Le Cone Beam CT – ou tomodynamométrie à faisceau conique – permet de faire des images en trois dimensions des vaisseaux. Et si cela existe depuis longtemps, on a vraiment gagné en qualité d'images ces dernières années. »

Enfin, outre la robotique (voir focus ci-contre), l'intégration de l'intelligence artificielle dans les salles hybrides est également en train de changer la donne, notamment grâce à des algorithmes permettant de détecter rapidement AVC, hémorragies et sténoses, et d'automatiser le triage des patients ainsi que la planification interventionnelle.

FOCUS

La stéréotaxie, technique de précision

Bien qu'utilisée depuis plus de 70 ans, la stéréotaxie a connu ces dernières années de nombreuses avancées.

Utilisée en neurochirurgie depuis les années 1950, la stéréotaxie permet d'atteindre avec précision des zones profondes du cerveau à des fins diagnostiques ou thérapeutiques. Elle combine les données issues de l'imagerie médicale 3D (IRM, scanner) à un système de guidage : un cadre en métal (dit cadre stéréotaxique) vissé sur le crâne du patient ainsi que sur la table d'opération. Doté d'un système de coordonnées, ce dernier fournit au neurochirurgien un repérage spatial lui permettant d'identifier au millimètre près la zone cérébrale où effectuer un prélèvement (biopsie), poser une électrode (stimulation cérébrale profonde) ou concentrer des faisceaux de radiation (radiothérapie stéréotaxique), par exemple.

Ces dernières années, la technique a toutefois connu de nombreuses avancées. Certaines équipes recourent, désormais, à des robots chirurgicaux. « Des clichés radiologiques sont réalisés au bloc opératoire pour permettre au neurochirurgien de recalculer l'IRM réalisée en

préopératoire sur le cadre de stéréotaxie fixé sur le patient à l'aide d'une console informatisée dédiée et reliée au robot chirurgical », explique le GHU Paris psychiatrie & neurosciences. La neuronavigation, sans cadre, à l'aide de reconstructions 3D du cerveau des patients élaborées à l'aide de logiciels de pointe se développe également. Les blocs opératoires « hybrides » dotés d'appareils d'imagerie de haute résolution permettent une vérification en temps réel de la position des instruments ou de l'effet thérapeutique recherché. Enfin, l'essor de la réalité augmentée qui superpose, en temps réel, des informations virtuelles (images, trajets, repères anatomiques) à la vision du chirurgien, via un écran ou un microscope, permet à ce dernier de mieux guider son geste.

Une double anti-agrégation plaquettaire est généralement prescrite pendant plusieurs mois après l'intervention, suivie chez certains patients d'un traitement antiplaquettaire au long cours.

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE : UN IMMENSE CHAMP DES POSSIBLES

L'intelligence artificielle (IA) se développe d'ores et déjà à différentes étapes des procédures en neuroradiologie :

- L'IA appliquée à la simulation préopératoire : « L'idée est de réaliser une ou plusieurs procédures virtuelles à partir d'images angiographiques pour tester plusieurs techniques et plusieurs implants, afin de prédire le meilleur résultat possible, explique le Pr Sébastien Soize, neuroradiologue au CHU de Reims. L'IA et la simulation permettront d'améliorer encore la personnalisation des approches. » Cela a d'ailleurs déjà commencé à prendre une large part pour les flows diverters et flows disruptors.
- L'IA au service de la robotique neurologique interventionnelle : « Dans ce cadre, elle permettrait d'augmenter le neuroradiologue, mais également de réaliser des procédures en distanciel afin d'améliorer le maillage notamment dans les zones sous dotées », illustre le Pr Soize.
- L'IA pour une meilleure compréhension des traitements utilisés et, ainsi, les personnaliser

encore davantage. Comment ? « En étudiant de manière rétrospective des années de traitements passés pour voir ce qui a le mieux fonctionné, détaille le Pr Soize. On parle là de Big Data au service de la recherche. »

- L'IA devrait aussi permettre de développer des outils pour améliorer la compréhension des pathologies : « Il existe par exemple des guides intelligents que l'on peut placer au travers d'un cathéter afin d'aller au contact du thrombus pendant que l'on traite un AVC par thrombectomie », poursuit le Pr Soize. Ce guide va prendre des mesures d'impédance, lesquelles seront analysées par l'IA pour prédire la composition du caillot et ainsi aider à adapter l'intervention. » D'autres guides qui utilisent la fibre optique et l'intelligence artificielle pour analyser les propriétés optiques des caillots et définir leur composition sont également en cours de développement.

En un mot, il s'agit de toujours rechercher une meilleure compréhension et un meilleur suivi des traitements.



COMPRENDRE LA NEUROSTIMULATION

Reposant sur la stimulation électrique, magnétique ou électromagnétique d'une partie du cerveau, d'un ou de plusieurs nerfs, voire de la moelle épinière, la neurostimulation – ou neuromodulation – est utilisée pour traiter certaines douleurs chroniques ainsi que certaines pathologies telles que la maladie de Parkinson, l'épilepsie pharmaco-résistante ou encore la dépression sévère.

La neurostimulation regroupe un ensemble de techniques thérapeutiques reposant sur la stimulation du système nerveux, central ou périphérique. En neurologie, elle s'adresse surtout à des patients atteints de pathologies ou douleurs résistantes aux traitements médicamenteux : la maladie de Parkinson, le tremblement essentiel, l'épilepsie, la dépression sévère, ou encore certaines douleurs chroniques neuropathiques. Des explorations plus ou moins avancées sont en cours pour la prise en charge des troubles obsessionnels compulsifs (TOC), des migraines chroniques mais aussi de certaines séquelles d'AVC et de traumatismes crâniens sévères, par exemple.

Une multiplicité de techniques

La neurostimulation repose sur différentes techniques de stimulation – électriques, magnétiques (stimulation magnétique répétitive) ou électromagnétiques (radiofréquence) – appliquées de manière invasive

(implantation d'un dispositif) ou non invasive (à travers la peau) selon les cas *(lire à ce sujet les différents chapitres ci-après).*

Celles-ci visent à moduler l'activité du système nerveux afin de réduire les symptômes, sans léser les tissus ni interrompre les voies nerveuses. Dans tous les cas, la neurostimulation fait partie intégrante d'une approche multidisciplinaire et personnalisée, après évaluation par des équipes spécialisées.

Une technique pour chaque zone

Chaque technique de neurostimulation cible une zone spécifique : les zones profondes du cerveau (stimulation cérébrale profonde), le cortex (stimulation magnétique répétitive, stimulation transcrânienne à courant direct), la moelle épinière (stimulation médullaire) ou encore les nerfs périphériques (stimulation du nerf vague, radiofréquence).

INTRODUCTION

LA NEUROSTIMULATION OU LE « POUVOIR » ÉLECTRIQUE ET MAGNÉTIQUE

De l'Antiquité aux technologies les plus avancées, l'électricité s'est progressivement imposée comme un outil thérapeutique à part entière. Longtemps empirique, son usage médical s'est affiné au fil des découvertes scientifiques sur le système nerveux et la douleur. Aujourd'hui, la neurostimulation illustre cette histoire faite d'innovations continues, ouvrant des perspectives majeures bien au-delà du seul traitement de la douleur.



Recourir à l'électricité pour soigner ? L'idée, loin d'être saugrenue, remonte à l'Antiquité. À cette époque, « *les poissons torpilles sont déjà utilisés pour leurs propriétés électriques à des fins thérapeutiques* », relate le Dr Rémy Dolhem dans son article « *Histoire de l'électrostimulation en médecine et en rééducation* », paru en 2008 dans les *Annales de réadaptation et de médecine physique*. Des écrits égyptiens, grecs mais aussi romains attestent en effet de l'intérêt des « décharges » provoquées par ces animaux pour traiter la douleur, ou encore différentes maladies nécessitant

un état d'anesthésie, telles que les maux de tête ou l'arthrite, évoque-t-il. Au XVIII^e siècle, l'usage de la bouteille de Leyde (ancêtre du condensateur) et des machines électrostatiques « *permettent à quelques praticiens de traiter des névralgies, contractures, paralysies...* », poursuit-il. Au XIX^e siècle, deux neurologues perfectionnent quant à eux la technique de l'électrothérapie : l'Allemand Robert Remak, qui parle de « *galvanothérapie* », et le Français Duchenne de Boulogne, connu pour avoir décrit, le premier, la myopathie qui porte son nom.

La théorie du Gate Control

Dès lors sont expérimentés l'électrostatique, les courants continus, les courants variables produits par des machines magnéto- et dynamo-électriques puis par des bobines d'induction, ou encore les courants à haute fréquence et à haute tension. Se développent ainsi l'électroanesthésie, puis, durant la première moitié du XX^e siècle, les recherches en électro-neurophysiologie et électro-radiologie. Puis, à partir des années 1960, les progrès de l'électronique et du traitement informatique couplés à la miniaturisation des dispositifs médicaux ouvrent la voie à l'électrostimulation dans ses diverses applications médicales. Les premières techniques de neurostimulation comme traitement des douleurs chroniques, par exemple, apparaissent à la suite d'un article du psychologue Ronald Melzack et du physiologiste Patrick Wall, paru en 1965. Ces deux scientifiques canadiens y énoncent la théorie dite du Gate Control ou « du portillon », selon laquelle l'organisme comporte des mécanismes physiologiques de régulation du « message douloureux » tout au long de son cheminement jusqu'au cerveau. L'un de ces mécanismes, particulièrement important, se situe au niveau de la moelle épinière.

Neurostimulation transcutanée... et percutanée

Partant de ce principe, la technique de neurostimulation électrique transcutanée, ou Transcuta-

neous Electrical Nerve Stimulator (TENS), a été mise au point. Celle-ci consiste à envoyer un courant électrique de faible tension à l'aide d'électrodes placées sur la peau à proximité de la zone douloureuse ou sur le trajet d'un nerf, pour atténuer le signal nerveux de douleur parvenant au cerveau via la moelle.

Une autre idée émerge alors : celle d'implanter des électrodes. Patrick Wall, en équipe avec William Herbert Sweet cette fois, a ainsi l'idée, en 1967, de stimuler les nerfs périphériques et les racines spinales (qui relie le système nerveux périphérique à la moelle épinière) à l'aide d'électrodes placées chirurgicalement, pour traiter des douleurs chroniques d'origine neurologique. Avec succès.

Le Dr Clyde Norman Shealy imagine quant à lui, la même année, l'implantation d'une électrode directement sur les cordons postérieurs de la moelle ! La stimulation dite « médullaire » est née. Elle se développe et se diffuse durant les années 1980 et est indiquée aujourd'hui dans les douleurs neuropathiques chroniques. La stimulation de nerfs périphériques conserve, pour sa part, un intérêt pour des patients souffrant de douleur neuropathique liée à un seul nerf lésé.

De la douleur... à l'assaut d'autres pathologies

Progressivement, la technique est explorée pour prendre en charge différents types de douleurs en stimulant les différentes structures du système

Une question de tempo

Le saviez-vous ? La stimulation rythmique auditive est une technique de rééducation neurologique non invasive qui utilise simplement le rythme sonore pour moduler l'activité cérébrale, notamment dans les fonctions motrices. Des sons réguliers (métronome, musiques calibrées, percussions) sont diffusés aux patients, souvent à travers un casque audio, pour que leur cerveau s'accorde naturellement au tempo proposé. Étudiée et décrite depuis plus de vingt ans, cette technique repose sur le principe selon lequel le cerveau, quand il entend un rythme régulier, a tendance à s'y synchroniser. Elle aide notamment les personnes atteintes de la maladie de Parkinson à améliorer leur marche et leur coordination.

1965

Publication de la théorie du Gate Control posant les bases de la neurostimulation dans le traitement de la douleur

1967

Première stimulation de la moelle épinière pour soulager les douleurs chroniques

1985

Première stimulation magnétique transcrânienne à des fins médicales

1987

Première stimulation cérébrale profonde réussie pour le tremblement essentiel à Grenoble

La neurostimulation, aussi pour poser un diagnostic !

Si la neurostimulation est souvent utilisée à des fins thérapeutiques, elle peut aussi avoir une visée diagnostique. En stimulant une zone précise du cerveau, des nerfs ou de la moelle épinière, les médecins peuvent observer les réponses motrices, sensibles ou comportementales du patient. Cela permet, par exemple, d'identifier la localisation d'un dysfonctionnement neurologique, de prédire l'efficacité d'un traitement ou de valider une cible avant une intervention chirurgicale. Un outil précieux pour comprendre le fonctionnement du cerveau... et mieux le soigner.

»» nerveux, y compris les structures cérébrales profondes et le cortex moteur. La stimulation des zones très profondes, situées au niveau du tronc cérébral, là où se trouvent des récepteurs de la morphine, est également expérimentée, notamment pour soulager les patients atteints de cancer. Mais elle restera peu utilisée, son efficacité étant partielle et de courte durée.

La neurostimulation est par ailleurs utilisée dans d'autres domaines que la douleur : les troubles ischémiques en 1972, ainsi que les troubles fonctionnels urinaires et fécaux dans les années 1980 (*lire à ce sujet le chapitre sur la stimulation des racines sacrées*).

En parallèle, la stimulation cérébrale profonde (SCP) présente des résultats très intéressants pour le traitement des troubles du mouvement : la dystonie, qui se manifeste par des spasmes involontaires et persistants des muscles du squelette, grâce à la stimulation du pallidum interne ; le tremblement, grâce à la stimulation du noyau ventral intermédiaire du thalamus ; ou encore la maladie de Parkinson, grâce à la stimulation des noyaux subthalamiques.

L'innovation au service de la précision

Naturellement, le matériel poursuit son évolution. Les neurostimulateurs implantés, auxquels sont reliées les électrodes, se miniaturisent. Le paramétrage se complexifie. Le plastique rigide est remplacé par du silicone souple. Enfin, les batteries sont de plus en plus souvent rechargeables, réduisant en conséquence le nombre d'interventions chirurgicales, et donc le risque infectieux pour les patients.

« De nouvelles électrodes, dites directionnelles, ont également fait leur apparition, souligne le Pr Jean-Philippe Azulay, past président de la Société française de neurologie et président de la Société francophone des mouvements normaux (SOFMA). Ainsi, le champ électrique, au lieu d'être diffusé de manière uniforme autour de l'électrode, est désormais orientable, ce qui permet de concentrer la stimulation sur une zone très ciblée et de mieux contrôler les effets secondaires du traitement. » Les plus récentes sont également capables « d'enregistrer l'activité cérébrale et, notamment, le rythme

Années
1990

Essor de la neurostimulation pour la douleur chronique, l'épilepsie, les troubles du mouvement, les troubles fonctionnels urinaires, la dépression sévère...

1996

Première stimulation magnétique transcrânienne à action répétitive

Années
2010-20

Développement des électrodes directionnelles, des neurostimulateurs enregistrant l'activité cérébrale, de la chirurgie robot-assistée en stimulation cérébrale profonde



dit bêta, qui est un rythme pathogène, afin d'affiner les réglages du neurostimulateur. »

Grâce aux progrès de l'imagerie – notamment l'échographie et l'IRM – et des logiciels associés, le placement des électrodes devient de plus en plus précis. « *Il est en outre désormais possible de localiser, parmi les différentes zones de contact que comporte chaque électrode, celles qui sont anatomiquement les mieux situées pour stimuler la cible* », relève le Pr Azulay.

Perfectionnement des techniques chirurgicales

Les techniques mêmes d'implantation ont évolué, même si des disparités subsistent entre les centres d'implantation. « *Historiquement, pour la SCP par exemple, les interventions duraient en moyenne douze heures. À présent, elles ne nécessitent plus, en moyenne, que six heures à six heures trente. La plupart des centres sont passés d'une chirurgie éveillée à une chirurgie sous anesthésie générale – quoique légère – pour, dans certains cas, permettre l'enregistrement de l'activité intracé-* >>>

»» rébrale durant l'intervention. Les procédures peuvent varier : certains centres recourent au ciblage direct à l'imagerie, d'autres conservent des techniques d'enregistrements physiologiques péroratoires ; certains utilisent des techniques stéréotaxiques classiques, d'autres sont passés à la chirurgie robot-assistée. Les interventions restent toutefois, de manière générale, plus courtes et permettent d'implanter, en une seule fois plutôt qu'en deux temps, le neurostimulateur et les électrodes. Cela raccourcit considérablement le temps d'hospitalisation, lequel est passé de près de trois semaines à dix ou douze jours. C'est, pour le patient, un vrai gain en termes de confort.»

Enfin, l'intelligence artificielle (IA) fait aussi son entrée dans le domaine. « Elle commence en effet

à être utilisée pour mieux cibler la zone précise d'implantation, notamment pour la SCP », complète le Pr Azulay.

Stimulations magnétiques et électromagnétiques

En parallèle, les équipes soignantes ont de plus en plus recours à d'autres types de stimulation, non plus électriques mais magnétiques, voire électromagnétiques. Dans les années 1970-80, la radiofréquence médicale se développe dans le traitement de la douleur chronique, à l'aide d'aiguilles spécifiques introduites à proximité des racines nerveuses ou des ganglions : un courant de radiofréquence est ainsi appliqué pour créer une

neurolyse contrôlée (radiofréquence thermique). Puis naît, dans les années 1990, la radiofréquence pulsée, qui ne détruit pas les tissus mais modifie l'activité nerveuse via des impulsions brèves et espacées... L'arsenal thérapeutique en neurologie se renforce par ailleurs avec la stimulation magnétique transcrânienne répétitive pour le traitement de la dépression résistante aux antidépresseurs.

Quid de l'avenir ?

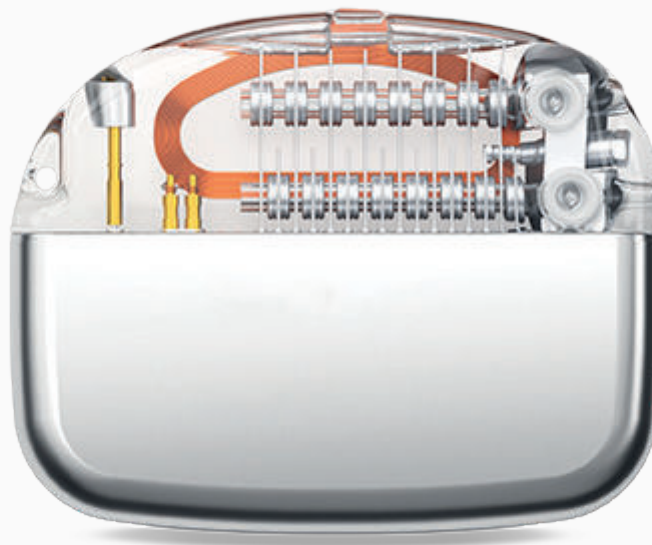
La neurostimulation continue d'être explorée dans diverses situations, par exemple auprès de patients souffrant de migraines chroniques ou de troubles psychiatriques résistant à la prise en charge classique. Cela concerne notamment le traitement des troubles obsessionnels compulsifs (TOC), des troubles du comportement alimentaire (comme l'anorexie mentale), voire de cas d'addiction ou de dépression sévères. Des essais sont en cours pour valider ces applications. Les recherches se poursuivent par ailleurs pour embarquer des capteurs et de l'IA dans les neurostimulateurs. « À terme, ces derniers seront sans doute capables de s'adapter, en temps réel, aux enregistrements de l'activité du système nerveux des patients », évoque le Pr Azulay. Enfin, des travaux sont également menés pour mettre au point des implants cérébraux permettant de restaurer la mobilité chez des personnes paralysées, des implants connectés, ou encore des interfaces cerveau-machine, certains intégrant l'envoi de signaux électriques pour réactiver les circuits moteurs.



STIMULATION MÉDULLAIRE

À L'ASSAUT DE LA MOELLE

Découverte dès les années 1960, la stimulation médullaire est aujourd'hui de plus en plus utilisée dans le traitement des douleurs neuropathiques persistantes. Ses indications ne cessent de s'élargir, à mesure que les connaissances physiopathologiques et les technologies de neuromodulation progressent.



DE LA THÉORIE...

La neurostimulation de la moelle épinière, ou neurostimulation médullaire, est décrite dès 1967 avec la première implantation réussie d'une électrode directement au niveau des cordons postérieurs de la moelle. Aujourd'hui, elle est indiquée dans le traitement de douleurs neuropathiques chroniques liées à une atteinte du système nerveux périphérique quelle qu'en soit l'origine (dia-

bète, traumatisme, chirurgie, neuropathie, zona...), mais également des douleurs persistantes après chirurgie rachidienne, ou encore de certains syndromes douloureux complexes des membres supérieurs ou inférieurs réfractaires aux traitements conventionnels. Sur le plan pratique, la technique consiste à implanter une ou plusieurs électrodes dans l'espace épidural[®], au contact de la moelle épinière. Ces électrodes sont reliées à un générateur implanté sous la peau, qui >>>

»»» délivre des impulsions électriques de faible intensité. Les stimulations n'« effacent » pas la douleur, mais elles modulent la transmission des messages nociceptifs au niveau médullaire, en modifiant l'activité des voies sensibles et des réseaux neuronaux impliqués dans la perception douloureuse. Il en résulte une diminution du ressenti douloureux et une amélioration fonctionnelle chez les patients répondeurs.

À LA PRATIQUE

L'électrode de stimulation est constituée d'un câble souple de très petit diamètre, recouvert d'un revêtement isolant protecteur. « Elle est

Une technique « de niche » en France

En 2019, seulement 2500 patients ont bénéficié d'une implantation de neurostimulateur en France, qu'il s'agisse d'une primo-implantation ou d'un remplacement, selon la HAS. La stimulation médullaire n'est en effet pas adaptée à toutes les douleurs chroniques. Elle reste également peu connue, coûteuse et nécessite un suivi spécialisé au sein d'une équipe pluridisciplinaire.

implantée dans l'espace périmédullaire graisseux, appelé espace péri-dural », explique le Dr Manon Duraffourg, neurochirurgienne et médecin de la douleur aux Hospices civils de Lyon. Sa « localisation précise dépend de la topographie des douleurs présentées par le patient : au niveau cervical pour les douleurs des membres supérieurs ; au niveau du rachis dorsal thoracique pour celles des membres inférieurs ; ou encore, au niveau du cône médullaire pour les douleurs pelvipérinéales », précise-t-elle. L'électrode, dont l'extrémité comporte plusieurs plots, est reliée à un neurostimulateur implanté sous la peau, tel « un pacemaker de la douleur ». Elle délivre « un courant électrique de faible intensité qui diffuse, à travers la graisse péri-durale, le liquide céphalo-rachidien, puis la moelle épinière elle-même », complète la neurochirurgienne.

Contrairement à une idée répandue, la stimulation médullaire ne vise pas à stimuler directement les fibres responsables de la transmission du message douloureux. Elle agit en modulant l'activité de la moelle épinière, en particulier les circuits impliqués dans la transmission et le contrôle des informations sensibles, ce qui entraîne une inhibition partielle des voies nociceptives ascendantes. Il ne s'agit donc pas d'une suppression de la douleur, mais bien d'une modification de son intégration et de sa perception par le système nerveux central. Technique réversible et ajustable, la stimulation médullaire est généralement proposée après échec des traitements conventionnels.

UNE HISTOIRE D'INNOVATION

La méthode trouve son origine dans la théorie du portillon ou « gate control », décrite pour la première fois en 1965. Celle-ci postule l'existence, au niveau de la moelle épinière, d'un système de régulation modulant la transmission des messages nociceptifs vers le cerveau, comparable à un mécanisme de porte susceptible de s'ouvrir ou de se fermer.

Dès 1967, ce concept est appliqué en pratique clinique, avec l'objectif « de stimuler, à l'aide de courants électriques de faible intensité, certaines fibres sensibles médullaires afin de moduler et d'inhiber la transmission du message douloureux », explique le Dr Duraffourg. C'est ainsi qu'est née la stimulation médullaire.

Des indications de plus en plus larges

Plus de cinquante années après son invention, la technique est reconnue pour traiter certaines douleurs chroniques, surtout lorsque les traitements classiques ne suffisent pas. Et selon le Dr Duraffourg, les indications se sont progressivement élargies année après année : « Initialement, la technique était principalement réservée aux douleurs lombaires persistantes après chirurgie du dos, relève-t-elle. Aujourd'hui, elle est proposée pour toutes les douleurs neuropathiques périphériques réfractaires aux médicaments, quelle que soit leur origine. »

1965

Découverte de la théorie du Gate Control

1967

Première neurostimulation médullaire

Années
2010

Essor des neurostimulateurs rechargeables et aux programmes variés

Années
2020

Essor des systèmes dits « en boucle fermée »



Sont ainsi concernés les patients diabétiques souffrant de neuropathie périphérique, les patients ayant subi une amputation et présentant un syndrome du membre fantôme ou des douleurs neuropathiques du moignon, ceux porteurs de lésions nerveuses périphériques traumatiques, ou encore les personnes atteintes de neuropathie induite par une chimiothérapie. « Dans ces cas, la stimulation médullaire permet de réduire la perception de la douleur, d'améliorer la qualité de vie et de favoriser le retour à certaines activités quotidiennes », note-t-elle.

Une discussion multidisciplinaire

Le recours à la stimulation médullaire n'est jamais décidé isolément. Avant toute implantation, le patient bénéficie d'une évaluation globale dans un centre d'évaluation et de traitement de la douleur (CETD). « Le patient rencontre plusieurs professionnels, notamment un médecin spécialiste de la douleur (algologue) et un psychologue ou psychiatre, afin d'évaluer l'impact émotionnel et comportemental »»

Près de **12**
millions

Chiffre clé

C'est le nombre de personnes qui, en France, souffrent de douleurs chroniques. Au total, moins de 3 % des patients douloureux bénéficient d'une prise en charge dans une structure spécialisée.

Source: SFETD

»»» de la douleur, détaille le D^r Duraffourg. *Le dossier est ensuite examiné lors d'une réunion de concertation pluridisciplinaire (RCP), afin de décider si la stimulation médullaire est appropriée. Si la technique est retenue, le patient reçoit toutes les informations nécessaires sur le fonctionnement de la technique, les bénéfices attendus, les limites, ainsi que sur les contraintes liées au matériel implanté.* »

Avant l'implantation, le patient rencontre à nouveau l'infirmière coordinatrice, le psychologue ou psychiatre, et le chirurgien et/ou l'anesthésiste

qui réalisera la pose de l'électrode et du boîtier. Cette approche pluridisciplinaire et progressive permet de garantir que le patient soit pleinement informé et que la technique soit utilisée de manière optimale.

Un suivi structuré et personnalisé

Dans un premier temps, seule l'électrode est implantée et reliée à un boîtier externe. « *Le patient reçoit alors une télécommande lui permettant d'ajuster les paramètres préprogrammés* », détaille le D^r Duraffourg. Cette phase de test, qui dure généralement une semaine, permet au patient de tester la thérapie à domicile, dans son quotidien, pour évaluer l'efficacité réelle de la stimulation sur ses douleurs. Si la stimulation s'avère bénéfique, le générateur est alors placé sous la peau, généralement au niveau de l'abdomen ou de la fesse, permettant au patient de bénéficier d'une stimulation continue et adaptée à sa douleur. Après l'implantation, « *un suivi étroit et structuré est systématiquement mis en place*, précise le D^r Duraffourg. *Une première consultation à un mois permet de contrôler la cicatrisation et d'optimiser les paramètres de stimulation. Des consultations de suivi sont ensuite habituellement programmées à trois puis à six mois, et enfin à un an postopératoire.* » À six mois, une consultation collective est proposée afin de favoriser les échanges entre patients. « *Ces temps de partage visent à prévenir le sentiment d'isolement après le retour à domicile, et à répondre aux questions ou inquiétudes*

De l'oreille à la moelle

Le saviez-vous ? Pour concevoir leurs premiers neurostimulateurs, les fabricants se sont inspirés des pacemakers... mais aussi des implants cochléaires, utilisés chez les patients souffrant de surdité profonde ! Ces dispositifs transforment les sons en signaux électriques transmis directement au nerf auditif, contournant ainsi l'oreille interne défaillante et permettant aux patients de retrouver partiellement l'audition.

pouvant survenir au cours du suivi », souligne la neurochirurgienne. Par la suite, le suivi s'inscrit dans le temps avec un rythme annuel.

Des bénéfices variables mais cliniquement pertinents

« *La technique a montré une efficacité clinique chez une proportion significative de patients, avec un taux d'amélioration moyen estimé autour de 50%, niveau à partir duquel un bénéfice fonctionnel est déjà observé* », poursuit le D^r Duraffourg. Cette amélioration s'accompagne le plus souvent d'un retentissement favorable sur la qualité de vie, avec une meilleure tolérance à l'effort, une amélioration des capacités fonctionnelles et, dans certains cas, une réduction des traitements antalgiques associés.



Chez certains patients sélectionnés, l'amélioration peut être plus marquée. À l'inverse, chez d'autres, l'évolution peut être plus limitée, notamment lorsque la douleur chronique s'inscrit dans un contexte de comorbidités associées, telles qu'un syndrome anxio-dépressif, justifiant le maintien d'une prise en charge médicamenteuse concomitante. « *L'évaluation de l'efficacité ne peut cependant se limiter à une appréciation quantitative de l'intensité douloureuse, telle que l'échelle visuelle analogique (EVA), dont l'interprétation isolée apparaît réductrice* », note la neurochirurgienne. Elle doit intégrer une analyse globale du retentissement de la douleur, prenant en compte les paramètres de qualité de vie, les capacités fonctionnelles, la mobilité, la reprise des activités quotidiennes ou professionnelles, ainsi que l'impact psychologique et émotionnel. Le recours éventuel à des traitements ou approches complémentaires fait également partie intégrante de cette évaluation. « *L'analyse est nécessairement multidimensionnelle, et la prise en charge de la douleur demeure, dans tous les cas, multimodale* », souligne-t-elle.

Des innovations technologiques continues

La technique bénéficie de progrès technologiques constants. Les dispositifs actuels sont de plus petite taille qu'auparavant. En 2025, certains neurostimulateurs présentent un volume inférieur à 14 cm³, ce qui facilite leur implantation et amé-

liore le confort des patients. Depuis les années 2010, des modèles rechargeables sont disponibles. La recharge s'effectue de manière transcutanée à l'aide d'un dispositif externe, permettant une durée de vie prolongée des implants, généralement estimée entre neuf et douze ans, contre trois à six ans pour les modèles non rechargeables (cette durée pouvant varier en fonction de la consommation électrique du programme utilisé, plus courte pour des programmes énergivores). Par ailleurs, tous les dispositifs actuellement commercialisés sont désormais compatibles avec l'IRM.

Les électrodes ont elles aussi connu des évolutions notables, et le nombre de leurs points de contact a considérablement augmenté, passant de quatre à trente-deux plots pour certains modèles (*lire encadré ci-contre*). Ces avancées permettent désormais des programmations plus complexes que par le passé, avec la possibilité de moduler la stimulation de manière ressentie ou non ressentie, offrant ainsi une finesse et une personnalisation accrues dans la prise en charge de la douleur.

« *Il y a encore quelques années seulement, un seul mode de stimulation, de type tonique, était proposé*, ajoute le Dr Duraffourg. *Les patients ressentait alors des fourmillements (ou paresthésies) qui masquaient la douleur. Désormais, le choix est beaucoup plus vaste – stimulations ressenties ou non, continues ou cycliques –, afin de personnaliser le traitement selon les indications et le profil de chaque patient.* » Il est ainsi possible de faire >>>

Deux modes d'implantation, deux types d'électrodes

Il existe, à ce jour, deux types d'électrodes utilisées pour la stimulation médullaire :

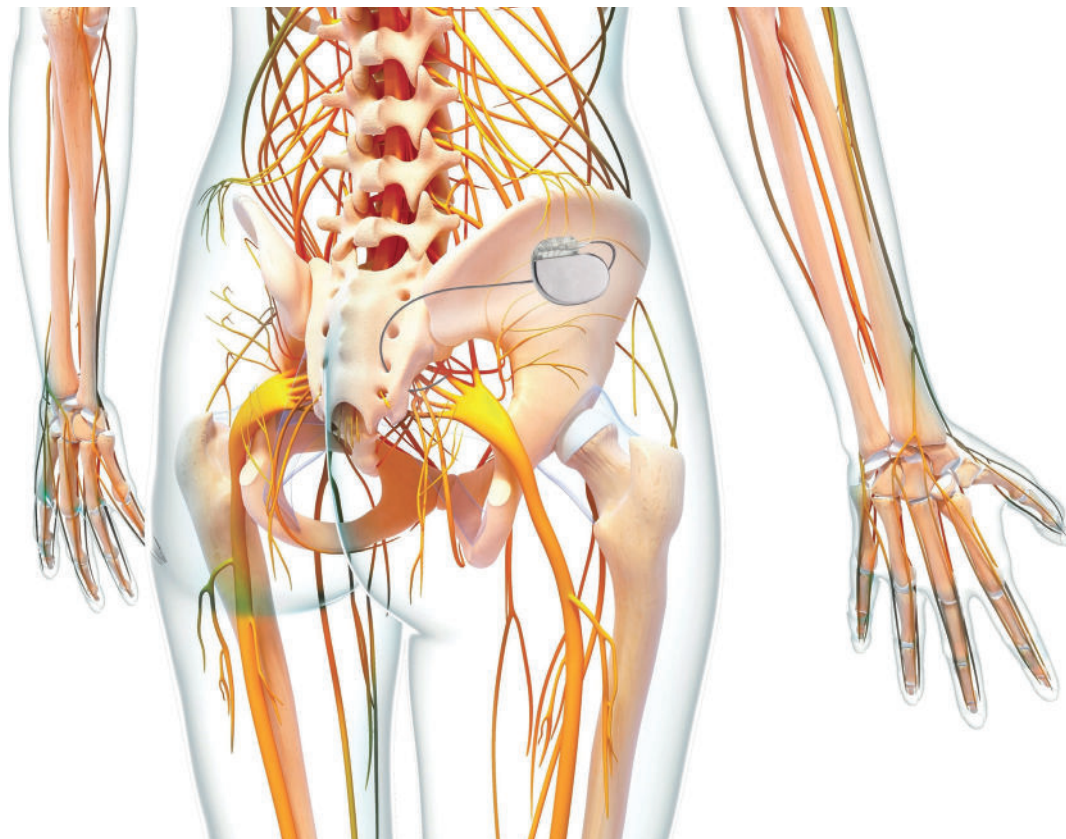
- **Les électrodes percutanées** sont implantées sous anesthésie locale et sédation vigile par un anesthésiste ou un neurochirurgien. La montée des électrodes et leur positionnement se font sous contrôle scopique pour garantir la localisation correcte dans l'espace épidural **6**. Ces électrodes comportent généralement jusqu'à seize points de contact (« plots ») pour délivrer le courant électrique. Elles sont utilisées dans plus de 90 % des cas, en raison de leur simplicité et de leur sécurité.
- **Les électrodes chirurgicales** sont implantées par un neurochirurgien sous anesthésie générale ou sédation profonde, avec un abord par laminectomie **6**. Elles permettent une stimulation multicolonne, offrant ainsi un contrôle précis de la couverture sensorielle et de la modulation de la douleur. Ces électrodes comportent jusqu'à trente-deux plots, pour une stimulation plus modulable et adaptée au profil du patient.

»» varier la sélection des plots à activer, d'opter pour des ondes à haute ou basse fréquence, d'envisager une stimulation en salves, ou encore de modifier l'amplitude, la durée ou la largeur de l'impulsion. La télécommande remise au patient lui permet de moduler l'intensité et le type de stimulation en fonction de ses besoins et de ses ressentis quotidiens.

Essor de la téléprogrammation

Les innovations ne s'arrêtent pas là. « À l'avenir, la téléprogrammation et le suivi à distance devraient se généraliser, réduisant le nombre de déplacements des patients à l'hôpital », prédit le D^r Duraffourg. À ce titre, certains industriels proposent déjà des solutions de téléprogrammation sécurisées permettant d'ajuster à distance les paramètres du neurostimulateur.

Par ailleurs, des systèmes dits « en boucle fermée » se développent. En France, ce type de dispositif a été implanté pour la première fois le 24 janvier 2024 au CHU de Poitiers. Des capteurs, placés directement sur l'électrode, mesurent la réponse du système nerveux à la stimulation trois millions de fois par jour, permettant d'optimiser et de personnaliser le traitement de manière automatique, en temps réel. Cette technologie évite la sur- ou la sous-stimulation, car l'efficacité de la stimulation dépend très fortement de la position de l'électrode et est susceptible de varier selon les mouvements, la toux ou encore d'autres



activités du patient. « Le stimulateur adapte la stimulation en permanence et permet de gagner en confort, en efficacité, et de doser au plus juste l'énergie requise pour le patient, en fonction de ses mouvements », explique le CHU. L'implantation, réalisée sous anesthésie éveillée, dure près d'une heure et demie. Elle nécessite la collabo-

ration étroite du neurochirurgien et de l'équipe d'anesthésie, ainsi que des échanges avec le patient pour positionner précisément l'électrode au bon endroit. Une avancée prometteuse, qui illustre parfaitement le potentiel des nouvelles technologies dans la prise en charge personnalisée de la douleur.

NEUROMODULATION DES RACINES SACRÉES

DE LA « NEURO » À L'UROLOGIE ET LA GASTRO- ENTÉROLOGIE

La neuromodulation des racines sacrées permet notamment de traiter l'incontinence urinaire et fécale.

DE LA THÉORIE...

On appelle « neuromodulation des racines sacrées » la pratique consistant à stimuler, par un courant électrique continu, des nerfs situés au niveau du bas du dos – les racines sacrées S3 – qui innervent la vessie et les muscles responsables de la continence.

Comme le rappelle Urofrance, elle est proposée en deuxième intention dans des cas d'envies d'uriner fréquentes et urgentes, associées ou non à des fuites d'urine (dite hyperactivité vésicale, laquelle touche 15 % de la population française), de difficultés à vider sa vessie par défaut de contraction de celle-ci et d'incontinence fécale (pertes de selles).

À LA PRATIQUE

Un neurostimulateur est relié à des électrodes placées au contact des nerfs innervant les organes du petit bassin et situés au niveau du sacrum. Après une phase de test de deux à quatre semaines à l'aide d'électrodes implantées et d'un boîtier externe pour déterminer si le traitement est efficace – c'est-à-dire s'il permet une « *amélioration d'au moins 50 % des symptômes et de la gêne ressentie* » –, le médecin peut procéder, avec l'accord du patient, à l'implantation du neurostimulateur « *sous la peau au-dessus de la fesse* », précise le CHU de Nantes. Le fil le reliant aux électrodes est lui aussi placé sous la peau. Le traitement reste toutefois réversible.

UNE HISTOIRE D'INNOVATION

Après quelques tentatives de traitement des troubles urinaires par stimulations électriques dans les années 1960, un groupe d'étude de l'Université de Californie démarre, en 1981, un programme clinique à partir d'études réalisées sur le chien. Puis, en 1997, la Food and Drug Administration (FDA), l'agence américaine des produits alimentaires et médicamenteux, reconnaît la neuromodulation sacrée comme un traitement des troubles mictionnels réfractaires aux traitements conventionnels. Dans le même temps, la technique prouve son intérêt dans le traitement de l'incontinence fécale et ce, dès 1995, date de publication de la première étude sur le sujet dans le *Lancet*.

Celle-ci agit à la fois sur le nombre d'épisodes d'incontinence fécale, les scores de gravité de l'incontinence, ainsi que les scores de qualité de vie, à court et moyen terme, relève l'Association nationale française de formation médicale continue en hépato-gastro-entérologie (FMC-HGE). Aujourd'hui, de nouvelles indications sont explorées, comme les douleurs chroniques au niveau du petit bassin, par exemple. Et pour accroître le confort des patients, les neurostimulateurs font désormais à peu près la taille d'un pacemaker. À noter également : certains modèles sont rechargeables.

STIMULATION DU NERF VAGUE

UNE STIMULATION DU CERVEAU... INDIRECTE

Pour les personnes souffrant d'épilepsie pharmaco-résistante et qui ne sont pas éligibles à la chirurgie de l'épilepsie, la neurostimulation peut être une option : la stimulation cérébrale profonde, mais aussi celle du nerf vague, proposées en complément des médicaments.



DE LA THÉORIE...

La stimulation du nerf vague (VNS en anglais) consiste à envoyer des impulsions électriques à travers ce nerf qui prend ses racines dans le cerveau et innerve le cœur, les poumons, le tube digestif, jusqu'aux organes génitaux. « *La technique a montré son efficacité dans le traitement de l'épilepsie, ou encore, chez l'adulte, de la dépression pharmaco-résistante* », pointe le Dr Nicole Chemaly, qui exerce au sein du service de neurologie pédiatrique de l'hôpital Necker-Enfants malades, à Paris.

À LA PRATIQUE

« *Tous les mécanismes d'action de la VNS ne sont pas encore connus, reconnaît la praticienne. Nous avons des hypothèses, mais nous avons encore des choses à découvrir à ce propos.* » Ce qui est certain, c'est que la stimulation du nerf vague permet de

modifier le fonctionnement électrique des neurones concernés par l'origine ou la diffusion des crises d'épilepsie. Et « *peut donc contribuer au contrôle des crises en diminuant leur nombre et/ou leur sévérité* », résume la Ligue française contre l'épilepsie (LFCE).

La stimulation n'est pas continue. Elle dure en moyenne trente secondes, et est reproduite toutes les cinq minutes tout au long de la journée – mais peut naturellement être adaptée en fonction des besoins du patient. « *C'est la répétition de ces stimulations dans la durée qui modifie progressivement le fonctionnement des parties du cerveau concernées par les crises* », poursuit la Ligue, qui précise qu'il « *faut patienter plusieurs semaines ou mois avant d'observer le premier effet* ». Le neurostimulateur « *est placé sous le bras ou le long du sein* », et « *relié à une électrode positionnée autour du nerf vague, voie d'accès pour la stimulation du cerveau* », complète le Dr Chemaly.

Années
1980

Premiers essais
chez l'animal

Années
1990

Mise sur le marché des
premiers équipements pour
le traitement de l'épilepsie
pharmaco-résistante

Début des années
2000

Extension de l'indication de la
VNS à la dépression sévère et
essor de nouvelles fonctionnalités
des neurostimulateurs

L'intervention, réalisée sous anesthésie générale par un neurochirurgien ou un chirurgien spécialisé en ORL et chirurgie cervico-faciale, dure entre une heure et une heure trente. Le réglage du dispositif ainsi que le suivi du patient sont ensuite assurés par un neurologue ou un neuro-pédiatre.

UNE HISTOIRE D'INNOVATION

L'épopée de la VNS débute à la fin du XIX^e siècle, lorsque le neurologue James Corning développe un « électrocompresseur carotidien » destiné à stimuler électriquement la région du nerf vague pour traiter l'épilepsie.

Bien que ses premiers essais montrent un certain succès, la méthode tombe dans l'oubli après sa mort en 1923. Puis, au XX^e siècle, des travaux expérimentaux chez l'animal redémarrent et montrent que la VNS peut influencer l'activité cérébrale, confirmant le potentiel de cette technique comme traitement antiépileptique.

Du chien à l'homme

Dans les années 1980, le neurophysiologiste américain Jacob Zabara, notamment, développe un dispositif implantable testé avec succès sur des chiens. Ce travail mène aux premiers essais cliniques prometteurs chez l'humain en 1988. Résultat : la technique est autorisée en Europe depuis 1994 et aux États-Unis depuis 1997, chez l'adulte et l'enfant. Elle est indiquée pour le traitement des épilepsies généralisées résistantes aux médi- >>>



600 000

Chiffre clé

L'épilepsie touche environ 1 % de la population mondiale, soit environ 650 000 personnes en France. Pour à peu près un tiers d'entre eux, les médicaments restent à ce jour inefficaces.

Source: Ligue française contre l'épilepsie.

»»» cements (environ 30% des patients, selon la LFCE). Elle peut également être proposée en cas d'épilepsies focales pour lesquelles la chirurgie du cerveau n'est pas possible ou a été un échec. Elle est, en France, prise en charge par l'Assurance maladie depuis 2004.

Un « pacemaker pour l'épilepsie »

« Nous y avons recours de manière assez régulière depuis 2012, évoque le Dr Nicole Chemaly. Notre plus jeune patient implanté a deux ans et demi / trois ans. » La neuropédiatre recense ainsi, dans son service de neurologie pédiatrique à l'hôpital Necker-Enfants malades, « en moyenne entre dix

et vingt implantations ou réimplantations de neurostimulateurs par an » et « un peu moins de 170 patients » concernés en file active. La thérapie « permet d'améliorer la qualité de vie des patients, notamment en réduisant le nombre de crises et d'effets secondaires des médicaments, qui peuvent être variés : troubles de l'humeur, troubles de l'appétit, somnolence... », explique-t-elle.

La stimulation du nerf vague réduit également certains risques, puisque l'épilepsie réfractaire aux traitements médicamenteux a un effet délétère sur le développement cognitif des plus jeunes, ou encore sur la santé mentale (anxiété, dépression...). Les patients sont également soumis à un risque accru de mort subite et inexplicée.

Six mois à un an d'ajustements

La fréquence et l'intensité de la stimulation sont progressivement ajustées sur « six mois à un an après l'implantation », poursuit le Dr Chemaly. Les réglages s'effectuent à l'aide d'une tablette connectée en bluetooth avec le neurostimulateur, l'objectif étant de stimuler, à terme, un nombre suffisant de fibres du nerf vague pour atteindre un niveau d'efficacité optimal de la stimulation. La prise de médicaments est elle aussi peu à peu adaptée. Deux types de crises répondent particulièrement bien à cette thérapie, précise la neuropédiatre : les crises toniques, qui peuvent provoquer des chutes, et les absences atypiques (lire encadré). « Une étude

L'épilepsie en bref

L'épilepsie se traduit par la survenue de crises liées à un dysfonctionnement bref et soudain de l'activité électrique du cerveau.

Les symptômes sont divers :

- **Des crises généralisées** : l'hyperactivité électrique touche l'ensemble du cerveau. En cas de crise dite « tonico-clonique », la personne perd connaissance, tombe au sol et convulse. Ces crises peuvent également être atoniques : les muscles se relâchent brusquement, provoquant une chute ainsi qu'une brève perte de connaissance. Les patients peuvent aussi avoir des absences.
- **Des crises focales** : seule une zone du cerveau est affectée, entraînant, selon sa localisation, des troubles de la parole, des hallucinations visuelles, auditives ou olfactives, des tremblements, des mouvements répétitifs involontaires...

Pour faciliter la gestion de certaines de ces crises, divers dispositifs ont été lancés. Sans fil, portés sur le corps (bras ou torse selon les modèles), certains déclenchent automatiquement une alerte à destination des personnes de confiance (SMS, appel, notification, sonnerie...) en cas de tremblements musculaires prolongés caractéristiques des convulsions. D'autres mesurent le mouvement et la fréquence cardiaque (notamment pendant le sommeil), ou encore l'activité électrodermale (indicateur du stress ou de l'activation du système nerveux autonome), les mouvements et la température de la peau.

récente, parue le 1^{er} avril 2025 dans la revue *Epilepsia*, constate une réduction médiane des crises tonico-cloniques de 73,9% chez des patients souffrant d'épilepsies généralisées, douze mois après leur implantation, ajoute-t-elle. Ce résultat est resté stable à vingt-quatre mois (77%). La sévérité de leur crise la plus invalidante a également diminué : 52,8% des participants la décrivaient comme 'sévère' ou 'très sévère' au départ ; ce chiffre est tombé à 25,3% après douze mois, puis à 26,3% après vingt-quatre mois. » Dès 2008, une étude montrait que 10% des patients présentaient, à un an, une réduction de plus de 90% des crises, rappelait la Haute Autorité de santé (HAS) dans un avis rendu le 4 mars 2020.

Une technique en évolution perpétuelle

Pour affiner la thérapie, de nouveaux neurostimulateurs ont été développés. Désormais, deux types de programmations différentes peuvent être définis sur une plage de vingt-quatre heures, pour, par exemple, réduire la stimulation la nuit. « La VNS peut parfois, chez les patients souffrant d'apnées du sommeil, majorer leurs symptômes. La fonctionnalité leur est donc utile », évoque le D^r Chemaly. Il est également possible, aujourd'hui, « de préprogrammer, par étapes, l'ajustement de la stimulation, pour réduire le nombre de déplacements des patients durant la phase d'adaptation post-implantation », complète-t-elle. Un mode « aimant » est également proposé : l'aimant est remis au patient et à ses proches par le neurologue et, lorsqu'il est placé en regard du neu-

rostimulateur, déclenche une stimulation supplémentaire – en général plus forte et plus longue que la stimulation habituelle. Utilisé au début ou au moment d'une crise, il est censé aider à stopper cette dernière ou à en réduire sa durée, en favorisant la récupération. La performance des batteries des neurostimulateurs a également été améliorée, pour une plus grande longévité.

À l'ère des neurostimulateurs « intelligents » ?

« Depuis quelques années, également, les neurostimulateurs sont capables de monitorer la fréquence cardiaque, qui a tendance à s'accélérer en cas de crise, et de déclencher automatiquement une stimulation supplémentaire au moment de l'accélération du rythme cardiaque qui serait le signe d'un début de crise », évoque le D^r Chemaly. Un réel progrès. « On ne peut pas encore, à distance, consulter les données de l'appareil pour analyser l'efficacité du traitement, ni effectuer de réglages à distance, mais il y a sans doute-là des pistes de réflexion pour l'avenir », note-t-elle. En parallèle, la résistance des électrodes disponibles a été renforcée, « ce qui a considérablement réduit leur risque de rupture », reconnaît-elle.

Au-delà de l'épilepsie

Des extensions d'indications sont également explorées. La VNS fait ainsi partie, depuis le début des années 2000, des options thérapeutiques en cas de dépressions sévères résistantes aux anti-

Le saviez-vous ?

Le 25 septembre 2017, une équipe de chercheurs au sein de l'Institut des sciences cognitives Marc-Jeannerod de Lyon a annoncé avoir redonné un début de conscience à un patient en état végétatif depuis quinze ans grâce à la stimulation du nerf vague. Le patient a plus tard succombé à une infection sans lien apparent avec la stimulation.

dépresseurs chez l'adulte, même si elle est encore peu proposée. Les recherches se poursuivent par ailleurs pour évaluer son intérêt dans la prise en charge des maladies inflammatoires (polyarthrite rhumatoïde, maladie de Crohn...), ou encore des migraines et céphalées en grappe, se caractérisant par des crises de douleur intenses qui surviennent en séries d'un côté des yeux, du front ou de la tempe. Des études sont également menées sur dans le traitement des maladies neurodégénératives (Alzheimer, Parkinson) ou encore, de l'insuffisance cardiaque.

STIMULATION CÉRÉBRALE PROFONDE

UNE ÉPOPÉE FRANÇAISE

La stimulation cérébrale profonde est née à la fin des années 1980, à Grenoble, grâce aux travaux des Pr^s Alim-Louis Benabid, neurochirurgien, et Pierre Pollak, neurologue. Ils ont en effet découvert que la stimulation de certaines structures cérébrales supprime certains symptômes de troubles neurologiques, tels que le tremblement essentiel ou la maladie de Parkinson... La technique s'est par la suite largement simplifiée grâce aux progrès technologiques.



DE LA THÉORIE...

La stimulation cérébrale profonde (SCP) consiste à implanter des électrodes dans des zones spécifiques et profondes du cerveau, telles que le thalamus ou les ganglions de la base (aussi appelés noyaux gris centraux), selon le trouble à traiter. Elle est indiquée pour le traitement de la maladie de Parkinson mal contrôlée par les médicaments anti-parkinsoniens (environ 80% des indications), du tremblement essentiel (environ 15% des indications) et des dystonies (troubles du tonus musculaire, qui touchent principalement les enfants), voire – c'est à l'étude – l'épilepsie et certains troubles psychiques

résistants aux autres formes de traitements, tels que des formes sévères de troubles obsessionnels compulsifs (TOC) ou de dépression.

Si elle ne permet pas de guérir les patients, la SCP améliore considérablement leur quotidien. Cette technique a également l'avantage de permettre une stimulation continue, adaptable et réversible.

À LA PRATIQUE

Les électrodes, qui possèdent à leur extrémité jusqu'à huit zones de contact (les « plots ») pouvant être stimulées indépendamment les unes des autres, sont reliées à un boîtier placé sous la peau

1987

Première stimulation cérébrale profonde à haute fréquence chez un patient atteint de tremblement essentiel, à Grenoble.

1993

Première utilisation dans la maladie de Parkinson

Début des années

2000

Premières électrodes avec contacts multiples (quadripolaires)

Années

2010

Électrodes directionnelles permettant de mieux cibler les zones à stimuler

Années

2020

Essor de la robotisation et de l'IA



au niveau des clavicules, voire dans le bas du ventre. Celui-ci est chargé de générer un courant électrique d'une intensité de deux à trois volts et d'une fréquence de 130 impulsions par seconde, rappelle le site du Vidal. Cette stimulation localisée permet de modifier le fonctionnement neuronal pour réduire les symptômes (douleur, tremblements, rigidité, dyskinésies, etc.). Elle est proposée aux patients après une concertation pluridisciplinaire (neurologue, neurochirurgien, psychiatre, neuropsychologue) et s'effectue en deux temps : la pose des électrodes puis, ultérieurement, celle du boîtier.

UNE HISTOIRE D'INNOVATION

Récompensée en 2014 par le prestigieux prix Lasker, la stimulation cérébrale profonde (SCP) est une innovation française. En 1987, les P^s Alim-Louis Benabid et Pierre Pollak du CHU de Grenoble publient en effet les résultats de la première application de la SCP à haute fréquence (100 hertz) au niveau du thalamus supérieur pour le traitement des troubles du mouvement. Puis, en 1993, la technique est explorée sur des sujets atteints de la maladie >>>

160 000

Chiffre clé

La stimulation cérébrale profonde, à ce jour, été appliquée à plus de 160 000 patients dans le monde.

Source: *Revue Pratique Neurologique* - FMC, Avril 2020.



»» de Parkinson, ouvrant la voie à une vraie révolution du traitement de cette pathologie, et, ultérieurement, sur des sujets atteints de dystonie..

Moins de 1 % des patients éligibles opérés

« Aujourd'hui, nous réussissons assez bien à moduler l'activité cérébrale grâce à la SCP », évoque le Pr Emmanuel Cuny, neurochirurgien au CHU de Bordeaux. Et si elle ne permet pas de guérir, la SCP donne des résultats spectaculaires, en améliorant les gestes de la vie quotidienne. Les patients atteints du tremblement essentiel peuvent ainsi souvent reprendre une activité normale (la marche, la parole et la posture), de même que ceux atteints de la maladie de Parkinson.

Si le traitement médicamenteux est parfois maintenu après la pose des électrodes, c'est généralement à des doses très inférieures à celles prescrites avant l'intervention. « Pourtant, encore très peu de

patients accèdent à cette technique de neurochirurgie fonctionnelle : nous opérons en moyenne dans le monde moins de 1 % des patients éligibles », poursuit le Pr Cuny. Cela représente « 500 patients par an en France », dont « une quarantaine » dans son service, à Bordeaux. Elle ne concerne, par exemple, « que 15 à 20 % des personnes atteintes de la maladie de Parkinson », qui doivent en effet répondre à des « critères bien précis pour être éligibles ». En outre, « l'intervention pour la pose des électrodes et du stimulateur est complexe, longue – entre quatre et six heures – et nécessite de nombreuses ressources en termes de personnel, de compétences et d'équipements », développe-t-il.

L'enjeu du ciblage de la zone à implanter

Des progrès sont toutefois notables en la matière. « Longtemps, l'électrophysiologie est restée indispensable à la localisation de la zone cérébrale à

Une implantation en deux temps

L'implantation du boîtier comme des électrodes s'effectue en deux temps, le premier étant la phase chirurgicale. Une fois le patient jugé éligible à la SCP, le neurochirurgien procède à l'implantation des électrodes puis du boîtier, reliés entre eux par un fil placé lui aussi sous la peau. Vient ensuite la phase de la programmation. Celle-ci est effectuée

par le neurologue, qui personnalise l'amplitude et la fréquence de la stimulation en fonction des besoins de chaque patient, dans le but d'obtenir le meilleur contrôle des symptômes avec le moins d'effets indésirables. Sur les modèles d'électrodes les plus récents, l'intensité de la stimulation peut être modulée pour chaque plot de chaque électrode.

Le saviez-vous ?

La maladie de Parkinson touche environ 175 000 personnes en France. C'est la seconde pathologie neurodégénérative la plus fréquente.

implanter. Concrètement, le patient, sous anesthésie générale, est 'réveillé' durant l'intervention pour procéder à des mesures électrophysiologiques et vérifier 'en direct' si les électrodes sont placées au bon endroit et si la stimulation électrique a un effet sur les symptômes. Depuis vingt ans, des recherches sont toutefois menées pour éviter cette phase de réveil », explique le Pr Cuny. L'objectif : aboutir à un vrai gain de temps et de confort pour les patients, tout en identifiant le plus précisément possible les zones cibles de l'implantation. Dans ce cadre, plusieurs pistes sont explorées. Parmi elles, « la constitution, à l'aide de technologies sophistiquées, d'atlas ou de cartographies 3D des structures cérébrales à partir de données anatomiques standardisées » à utiliser « en combinaison avec les images du cerveau du patient obtenues grâce à l'IRM » pour « s'approcher au plus près de la réalité anatomique du patient en question ». Ces techniques « fonctionnent plutôt bien même s'il persiste encore, parfois, un certain degré d'incertitude quant à la localisation exacte de l'implantation des électrodes ».

D'autres pistes misent pour leur part sur l'enregistrement et le suivi de biomarqueurs au sein du cerveau pour stimuler à bon escient, une approche « *plus physiologique* » et « *moins anatomique* », relève le Pr Cuny.

Les espoirs de l'IA

Lui-même a travaillé sur un logiciel intégrant de l'IA. L'outil aide les praticiens à identifier les zones du cerveau à cibler, à partir d'une simple IRM pré-opératoire d'un patient couplée aux données cliniques recueillies auprès de malades déjà opérés avec succès, explique-t-il.

« *Nous avons analysé les IRM de patients présentant plus de 60% d'évolution favorable après leur implantation, pour identifier la localisation précise de leurs électrodes, constituer une solide base de données et, in fine, permettre de prédire les meilleures zones d'implantation* », évoque celui pour qui « *l'avenir de la SCP passe par l'intégration de l'intelligence artificielle* ».

« *Des essais cliniques, dont les résultats seront publiés prochainement, montrent déjà l'efficacité de cette solution* », glisse-t-il, prouvant que la France reste innovante en la matière. Pour aller plus loin, « *nous travaillons, toujours grâce à l'IA, à affiner le ciblage des zones d'implantation en fonction du profil du patient : âge, sexe, origine ethnique, durée de la maladie, importance des symptômes...* », poursuit-il. L'enjeu ? « *Simplifier les procédures pour que la SCP puisse être accessible à un plus grand nombre de patients.* »

Jumeaux numériques et robots

D'autres techniques viennent faciliter le geste des neurochirurgiens. En phase pré-opératoire, « *la tractographie est de plus en plus utilisée*, précise le neurochirurgien. *Elle repose sur l'IRM de diffusion et permet de visualiser les connexions neuronales dans*

Neurostimulation versus chirurgie lésionnelle

Dans le traitement des troubles neurologiques comme la maladie de Parkinson ou le tremblement essentiel, outre les médicaments, existent deux grandes stratégies : la SCP et la chirurgie lésionnelle. La première est réversible, ajustable et évolutive, mais elle implique l'implantation d'un neurostimulateur et d'électrodes. Certains patients préfèrent ainsi opter pour la chirurgie lésionnelle. « *Elle repose sur l'utilisation de rayons gamma dans le cadre d'une radiochirurgie ou d'ultrasons focalisés de haute intensité pour créer une lésion au niveau de la zone cérébrale impliquée dans le trouble. Elle ne nécessite pas d'ouvrir le crâne et est souvent réalisée en ambulatoire. Elle est, en revanche, irréversible* », détaille le Pr Cuny.

»» le cerveau. » Autre évolution : l'essor des « jumeaux numériques » des patients, modélisés sur la base de scanners et d'IRM de leur cerveau grâce à des logiciels de reconstructions 3D, pour faciliter la préparation de l'intervention.

Ensuite, en phase opératoire, la technique la plus courante est de maintenir la tête du patient à l'aide d'un cadre stéréotaxique rigide, qui contient également un système de repérage tridimensionnel pour l'introduction précise des électrodes, sous contrôle de l'imagerie. « Il n'existe pas de repère anatomique fiable à l'extérieur du crâne. On a besoin

du cadre de stéréotaxie pour aligner les images IRM avec la tête du patient », détaille le Pr Cuny. Toutefois, les pratiques évoluent. « En plus du cadre, nous utilisons de plus en plus des systèmes robotisés pour améliorer la précision de nos gestes et gagner en fiabilité. » La localisation précise de la cible – sous forme de coordonnées – peut d'ailleurs être directement renseignée dans le robot chirurgical, détaille le neurochirurgien

L'intérêt de la réalité augmentée

Se développe par ailleurs la chirurgie stéréotaxique sans cadre, rendue possible grâce à des systèmes de repérage par neuronavigation (guidage per-opératoire en temps réel par IRM ou scanner 3D), à des repères osseux ou des vis fixés au crâne quelques jours avant l'opération et, éventuellement, à un robot. Le recours à la réalité augmentée est, lui aussi, de plus en plus courant, « pour incorporer la planification de l'intervention au sein du microscope opératoire, qui apparaît alors en surimpression », explique le Pr Cuny.

Perfectionnement des électrodes et boîtiers

Avec le temps, les électrodes ont elles aussi évolué. « Depuis cinq à six ans, elles sont segmentées ou directionnelles, permettant ainsi de diriger précisément le courant électrique vers les zones à stimuler », souligne le Pr Cuny. Elles « augmentent



considérablement les capacités de réglage pour personnaliser les prises en charge ».

Les boîtiers ont quant à eux diminué de volume. Aujourd'hui, les neurostimulateurs sont compacts et profilés. Certains sont rechargeables, d'autres non. La durée de vie des premiers atteint aujourd'hui vingt-cinq ans pour certains modèles. La recharge – environ vingt à trente minutes par semaine – s'effectue via un système d'induction, à l'aide d'un collier à poser autour du cou, par exemple. En cas d'oubli, les réglages de la stimulation ne sont pas perdus et seront de nouveau effectifs après

L'espoir d'une stimulation profonde sans chirurgie ?

Des recherches sont actuellement menées pour stimuler des structures profondes du cerveau sans passer par la chirurgie. Une méthode, différente de la SCP, est notamment à l'étude : la stimulation par interférence temporelle transcrânienne. Des électrodes, placées sur le cuir chevelu, délivrent des signaux électriques de haute fréquence à travers le crâne. La légère différence de fréquence entre les courants devient, à l'endroit où ils se croisent, la fréquence de stimulation effective requise pour stimuler la zone cible.

recharge. Les seconds peuvent tenir deux à cinq ans avant de devoir être remplacés, selon l'utilisation qui en est faite (intensité de la stimulation, période d'utilisation... sachant que pour les patients atteints de la maladie Parkinson comme de dystonie, la batterie fonctionne 24h sur 24).

Après l'implantation... la programmation

À noter que des pré-programmations sont aujourd'hui possibles, ensuite affinées avec le neurologue et le patient. Dans d'autres cas, la programmation complète a lieu quelques jours après l'intervention, à l'aide d'une tablette ou d'un ordinateur communiquant en Bluetooth avec le neurostimulateur.

« Pour les tremblements essentiels, les réglages sont un peu plus simples que pour la maladie de Parkinson, pour laquelle, après l'implantation, il faut ajuster l'intensité et la fréquence du courant ainsi que le traitement médicamenteux dans le cadre de plusieurs consultations, précise le Pr Cuny. De nouveaux réglages doivent en outre, parfois, être effectués quelques années plus tard, avec l'évolution de la maladie. » Pour réduire le nombre de déplacements des patients, des ajustements à distance sont donc aujourd'hui envisageables (lire sur ce sujet le chapitre sur la neurostimulation à distance). « Nous avons deux patients à La Réunion que nous suivons ainsi », explique le neurochirurgien. La technique existe. À terme, sa généralisation facilitera la prise en charge et le confort des personnes implantées.

Quelles innovations pour l'avenir ?

À l'avenir, d'autres évolutions sont attendues, dont la stimulation adaptative, pour adapter la stimulation en fonction de marqueurs détectés en temps réel. De plus, en termes d'indications, certains centres recourent à la SCP en cas de TOC graves et résistants aux traitements classiques (médicaments et thérapie cognitivo-comportementale).

« Certaines implantations montrent de bons résultats mais le succès du traitement dépend pour beaucoup des patients et de leurs symptômes. » Elle « fait également l'objet d'études cliniques pour d'autres pathologies comme l'épilepsie pharmacorésistante et la dépression sévère, par exemple », conclut le neurochirurgien. Des essais sont également en cours pour la maladie d'Alzheimer. Enfin, des expériences de stimulation cérébrale de structures profondes du cerveau sans recours à la chirurgie, à l'aide d'électrodes posées sur le crâne, sont également menées, notamment à Lausanne.

La SCP pour restaurer les fonctions cognitives après un traumatisme crânien ?

Aux États-Unis, les Universités de Stanford et Cornell explorent l'intérêt d'implanter des électrodes dans une zone clé du cerveau, le thalamus, afin de stimuler électriquement les circuits neuronaux altérés chez des personnes victimes de traumatismes crâniens sévères. Dans un article paru en décembre 2023, dans la revue *Nature*, elles évoquent ainsi des résultats prometteurs, soulignant l'amélioration des performances des personnes implantées lors de tests d'attention et de mémoire. Parmi elles, une femme victime d'un grave accident de voiture en 2001, plongée 14 jours dans le coma. Elle témoigne de progrès spectaculaires : meilleure concentration, mémoire restaurée, équilibre retrouvé. Les quatre autres patients inclus dans l'étude présentaient également des améliorations nettes : ils réfléchissaient 30% plus vite quand les électrodes étaient activées que lorsqu'elles étaient éteintes. De nouveaux essais cliniques sont attendus.

TRAITER LA DÉPRESSION ET LA DOULEUR CHRONIQUE

La stimulation magnétique transcrânienne répétitive (rTMS), à ne pas confondre avec la sismothérapie ou électroconvulsivothérapie (ECT), est indiquée dans le traitement de certaines pathologies psychiatriques ou neurologiques.

DE LA THÉORIE...

La stimulation magnétique transcrânienne répétitive (rTMS) repose sur l'utilisation d'impulsions magnétiques pour générer une activité électrique dans le cerveau et moduler l'activité de certains réseaux cérébraux. Elle a prouvé son intérêt dans le traitement de la dépression résistante aux antidépresseurs ou, encore, de la douleur chronique neuropathique.

À LA PRATIQUE

« De brèves impulsions magnétiques sont produites à l'aide d'une bobine posée sur la tête du patient. Le champ magnétique résultant traverse la boîte crânienne sans être atténué par le passage de l'os – contrairement aux courants électriques – pour atteindre le cerveau situé à quelques centimètres de

la bobine », précise le Dr Benjamin Bardel, neurologue au sein de l'unité de neurophysiologie clinique de l'hôpital Henri-Mondor (AP-HP) de Créteil. En répétant les impulsions plusieurs fois par seconde, la rTMS peut moduler l'activité d'un certain nombre de circuits cérébraux.

UNE HISTOIRE D'INNOVATION

« Les effets des champs magnétiques sur le cerveau ont été décrits pour la première fois par Arsène d'Arsonval en 1896, resitue le Dr Bardel, mais c'est dans les années 1980 que la stimulation magnétique transcrânienne (TMS) a réellement émergé, grâce aux travaux du chercheur Anthony Barker. » Avec ses collègues du Royal Hallamshire Hospital de Sheffield, en Angleterre, il utilise en effet une bobine de Faraday placée sur le cuir chevelu, au-dessus de la zone motrice gauche du cerveau. Résultat :



1985

Première stimulation magnétique transcrânienne à des fins médicales

Milieu des années
1990

Premières stimulations répétitives à visée thérapeutique

Années
2010

Essor de la neuronavigation pour la rTMS



3 à 6
semaines

Chiffre clé

Le protocole conventionnel, en cas de dépression sévère, implique 15 à 30 séances uniques quotidiennes sur 3 à 6 semaines de stimulations magnétiques de haute fréquence.

Source: Haute Autorité de santé (HAS), juillet 2022.

ils observent un mouvement dans la main droite. L'expérience a été réalisée... sur les chercheurs eux-mêmes ! Elle suscite un grand enthousiasme au sein de la communauté scientifique internationale.

Du diagnostic à la thérapie

« *Barker et son équipe mettent ainsi au point le premier stimulateur magnétique utilisable chez l'homme en pratique clinique, résume le Pr Jean-Pascal Lefaucheur, également neurologue et responsable de l'unité de neurophysiologie clinique de l'hôpital Henri-Mondor. En revanche, à cette époque, la TMS a un usage essentiellement diagnostique : une impulsion unique est générée pour stimuler les neurones moteurs et enregistrer la réponse musculaire selon la méthode des potentiels évoqués moteurs (PEM). Il faut attendre le milieu des années 1990 pour qu'elle évolue vers des applications thérapeutiques, avec le développement de la technique de stimulation magnétique transcrânienne répétitive (rTMS).* » À l'hôpital Henri Mondor, le tout premier appareil de rTMS acquis en France est mis en service en 1996.

Deux indications bien établies

« *Deux indications thérapeutiques sont aujourd'hui bien établies pour la rTMS : les épisodes dépressifs majeurs résistants – c'est-à-dire ne répondant pas à un ou deux traitements médicamenteux – et la douleur chronique neuropathique, en cas d'atteinte du système nerveux central ou périphérique. La >>>*

»» rTMS peut alors être utilisée après l'échec de deux lignes de traitements médicamenteux », détaille le Pr Lefaucheur.

Une autre indication bénéficie d'un bon niveau de preuve : « La rééducation post-AVC, notamment pour les troubles moteurs et l'aphasie, mais dont la mise en pratique est toutefois plus complexe car la rTMS doit, dans ce cas, être combinée avec des techniques de rééducation physique ou du langage », poursuit le Dr Bardel.

Des recherches continuent par ailleurs de se développer quant à l'intérêt de cette technique dans la prise en charge des symptômes négatifs de la schizophrénie, des troubles anxieux, des troubles obsessionnels compulsifs, des addictions, de la maladie de Parkinson... « À l'avenir, le champ des indications de la rTMS pourrait s'élargir bien au-delà des usages actuels », confirme le Pr Lefaucheur.

Sous surveillance médicale

Le traitement est réalisé sous surveillance médicale par un médecin ou un technicien en neurophysiologie formé à la rTMS. « Le patient, éveillé, est installé dans un fauteuil confortable conçu à cet effet. Une bobine est placée sur son cuir chevelu. Elle délivre un champ magnétique qui traverse le crâne pour stimuler une zone précise du cerveau – différente selon qu'il s'agit de traiter une dépression (cortex préfrontal) ou une douleur neuropathique chronique (cortex précentral). L'intensité du champ délivré est propre à chaque patient. La machine émet un bruit répétitif de claquement (tac-tac-tac). Le patient peut ressentir une cer-

taine tension au niveau du cuir chevelu, mais cela reste en général bien toléré », détaille le Dr Bardel.

Des séances courtes mais répétées

Chaque séance dure vingt à trente minutes maximum, selon les protocoles. Le traitement repose sur une répétition des séances : la stimulation répétée d'une même zone induit un phénomène de plasticité permettant de modifier durablement l'activité cérébrale. « Ses effets peuvent se prolonger et s'intensifier sur plusieurs jours ou semaines à la répétition des séances », poursuit le Pr Lefaucheur. Le rythme des séances dépend, lui aussi, des indications et du protocole choisi. « Pour les douleurs, des séances une fois par jour espacées de plusieurs jours et, progressivement, de plusieurs semaines, sont généralement préconisées. Le protocole peut également être adapté en fonction d'éventuelles rechutes ou recrudescences des douleurs, évoque-t-il. Pour la dépression, une à plusieurs séances par jour pendant plusieurs jours, mais sur une période de quelques semaines, voire plus courte, peuvent être envisagées, le temps d'agir sur l'épisode dépressif. »

Des technologies de plus en plus précises

Progressivement, la technique s'est perfectionnée. Des bras robotisés ont ainsi été développés pour maintenir automatiquement la bobine en place sur le cuir chevelu du patient, même si ce dernier

bouge. Les bobines, elles, se sont diversifiées, délivrant un champ magnétique plus ou moins focal selon les indications. Mais surtout, pour mieux cibler la stimulation et la rendre reproductible d'une séance à l'autre, des systèmes de neuronavigation dédiés à la pratique de la rTMS ont été mis au point. Cette technique permet, à l'aide d'une reconstruction 3D du cerveau à partir de la propre IRM cérébrale du patient intégrée dans le système, de fournir à l'opérateur un retour en temps réel sur le positionnement précis de la bobine afin de l'ajuster si nécessaire.

Des espoirs pour l'avenir

À l'avenir, une meilleure compréhension de la connectivité cérébrale est attendue, pour une plus grande personnalisation des soins. « Aujourd'hui, les traitements ciblent des zones cérébrales bien identifiées, impliquées dans des pathologies comme la dépression ou la douleur chronique. Mais il est encore difficile de savoir, pour un patient donné, quels circuits cérébraux sont affectés. L'un des grands enjeux actuels de la recherche est d'identifier précisément les circuits cérébraux à stimuler chez chaque patient, afin d'obtenir l'effet thérapeutique recherché tout en évitant de stimuler inutilement d'autres circuits », indique le Pr Lefaucheur. Ce niveau de personnalisation – la bonne zone, à la bonne intensité, au bon moment, chez la bonne personne – ouvrirait la voie à une neuromodulation de plus en plus fine et individualisée.

RADIOFRÉQUENCE

LE POUVOIR DES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Face aux douleurs persistantes, plusieurs approches thérapeutiques mini-invasives existent. Parmi elles, la radiofréquence connaît un intérêt grandissant.

DE LA THÉORIE...

La radiofréquence est utilisée pour traiter certaines douleurs, notamment neuropathiques et articulaires, réfractaires aux traitements conventionnels. Elle repose sur l'émission d'ondes électromagnétiques à haute fréquence – 400 à 500 kilohertz – au contact d'un ou de plusieurs nerfs. Celles-ci provoquent une agitation locale des particules (« ions »), dont la friction finit par provoquer un échauffement à l'extrémité d'une électrode insérée dans les tissus. La température est contrôlée en permanence à l'aide d'un capteur. Deux modalités se distinguent aujourd'hui : la radiofréquence thermique (ou lésionnelle) et la radiofréquence pulsée.

À LA PRATIQUE

« La radiofréquence thermique vise à interrompre la transmission d'un signal douloureux en provoquant une destruction partielle et contrôlée d'un nerf. En effet, les ondes électromagnétiques, délivrées en continu, élèvent localement la température jusqu'à environ 80°C entraînant une neurolyse ciblée, explique le Dr Cyril Quemeneur, médecin anesthésiste-réanimateur et médecin algologue au sein de l'hôpital Raymond-Poincaré (AH-HP), à Garches, et de la clinique Drouot Sport & Arthrose, à Paris. Cette technique est aujourd'hui bien établie dans le traitement de douleurs mécaniques chroniques : l'arthrose du genou et de l'épaule ou, encore, les douleurs facettaires lom-

baies, par exemple. » La radiofréquence pulsée, elle, repose sur « l'émission d'ondes électromagnétiques de façon discontinue, généralement deux fois par seconde pendant une durée de vingt milli-secondes, sans élévation importante de la température (en général autour de 42°C) », poursuit-il. Elle ne provoque pas de lésion thermique des tissus, mais module l'activité électrique du nerf. « Elle permet d'agir sur certaines douleurs neuropathiques, arthrosiques et névralgiques chroniques, ou encore, des douleurs post-opératoires persistantes », poursuit le médecin.

UNE HISTOIRE D'INNOVATION

Les premiers pas de la radiofréquence médicale remontent aux années 1950, avec les travaux du physicien Eric R. Cosman Sr. Elle n'a toutefois été utilisée pour le traitement de la douleur chronique qu'à partir des années 1970, à l'aide d'un champ électromagnétique continu. Dans les années

Nerf moteur, nerf mixte, nerf sensitif

Le type de radiofréquence utilisé dépend du type de nerf à traiter. La radiofréquence lésionnelle est utilisée sur les nerfs sensitifs uniquement. La radiofréquence pulsée est réservée aux nerfs mixtes, voire sensitifs.

Années
1970

Début de la
radiofréquence
thermique

Années
1990

Développement de la
radiofréquence
pulsée

Années
2000

Essor de la
radiofréquence
refroidie

1980, l'arrivée d'électrodes plus fines a permis des interventions plus précises. Le risque de léser des nerfs moteurs restant toutefois élevé, la radiofréquence pulsée a vu le jour dans les années 1990 : « Elle maintient la température en dessous de 45°C, évitant ainsi toute destruction tissulaire », développe le D^r Quemeneur.

Chiffre clé

6 mois
minimum

« Un traitement par radiofréquence thermique peut apporter une efficacité de 6 à 24 mois. Un traitement par radiofréquence pulsée, de 3 à 6 mois – parfois 12. »

Source: D^r Cyril Quemeneur.

30 et 45 minutes de traitement

Explorée pour les douleurs lombaires, thoraciques et cervicales, la technique a progressivement été appliquée dans de nombreux syndromes douloureux chroniques.

« La radiofréquence tend à se développer en France. Utilisée par les radiologues interventionnels, les anesthésistes-réanimateurs ou encore les neurochirurgiens, elle s'inscrit dans un parcours de soins structuré et multidisciplinaire, en complément d'une rééducation fonctionnelle, d'un suivi de la douleur, d'un éventuel traitement médicamenteux, etc. », précise le D^r Quemeneur. Elle est réalisée sous anesthésie locale ou sédation légère.

« L'intervention dure entre trente et quarante-cinq minutes, selon le nombre de nerfs à traiter, poursuit-il. Il faut, en moyenne, compter cinq à quinze minutes de traitement par nerf. » Le geste est guidé par l'image, à l'aide d'un scanner ou, de plus en plus, d'un échographe pour une plus grande précision du geste sans exposition à des rayons ionisants.

Des évolutions constantes

La technique s'est diversifiée ces dernières années avec l'essor de la radiofréquence refroidie – une radiofréquence thermique avec circulation d'eau dans l'aiguille, « pour obtenir une lésion plus large tout en évitant une montée trop rapide de la température au point de contact », souligne l'anesthésiste-réanimateur. Les générateurs d'ondes les plus récents disposent, également, de deux modes, monopolaires et bipolaires, pour utiliser conjointement deux électrodes et effectuer de plus grandes lésions. Les électrodes sont quant à elles désormais proposées en plusieurs tailles.

Jusqu'à 80 à 90% d'efficacité perçue

« Certains articles rapportent jusqu'à 80-90% d'efficacité pour les patients correctement sélectionnés », relève le D^r Quemeneur. La technique reste « en évolution constante, avec des avancées prometteuses dans des indications de plus en plus larges ». L'enjeu, désormais, « est de travailler à une meilleure reproductibilité des résultats, notamment grâce à un meilleur contrôle de la dose d'énergie délivrée et à l'optimisation de la lésion ou de la modulation obtenue, pour une efficacité toujours plus ciblée », observe le médecin.

Reste, enfin, le développement de techniques non-invasives : la radiofréquence percutanée existe déjà mais reste peu utilisée en pratique, avec un niveau de preuve encore insuffisant.

NEUROSTIMULATION À DISTANCE

PREMIERS PAS VERS LA « TÉLÉ- NEUROLOGIE »

Le réglage des neurostimulateurs est essentiel à la bonne prise en charge des patients implantés. Pour leur éviter de nombreux déplacements à l'hôpital, parfois fatigants et contraignants, la programmation à distance se développe peu à peu.



DE LA THÉORIE...

La neurostimulation à distance permet à un médecin de régler un neurostimulateur implanté chez un patient sans que celui-ci ait à se déplacer à l'hôpital. Une révolution dans le cadre de la neurostimulation médullaire (au niveau de la moelle épinière) et de la stimulation cérébrale profonde (*lire sur ce sujet les chapitres dédiés*).

À LA PRATIQUE

Grâce à une application sécurisée, le neurologue ou le neurochirurgien peut, dans le cadre d'une téléconsultation, dialoguer à distance avec le patient, accéder aux paramètres du neurostimulateur (intensité, fréquence, durée...) et les ajuster en temps réel.

UNE HISTOIRE D'INNOVATION

Jusqu'à présent, le réglage des neurostimulateurs s'effectuait exclusivement lors de consultations en présentiel. Désormais, il peut être réalisé en temps

réel lors de téléconsultations, grâce à une plateforme sécurisée permettant au médecin d'intervenir à distance sur le dispositif implanté du patient. La technique a fait ses premiers pas en 2021 aux États-Unis – et en mars 2023 en France, à l'initiative du D^r Naoufel Querchefani, neurochirurgien et spécialiste de la neurostimulation à distance au sein, notamment, de l'Hôpital européen de Paris. « *J'exerçais alors à l'hôpital Foch, à Suresnes en Île-de-France, se souvient-il. L'une de mes patientes, traitée par neurostimulation médullaire pour cause de douleurs neuropathiques chroniques, a été obligée de quitter la région pour des raisons familiales. Au regard de la relation de confiance qui s'était nouée entre elle et notre équipe, elle souhaitait continuer à être prise en charge au sein de notre hôpital, mais cela supposait des déplacements à la fois longs et fatigants.* »

Soins « sans frontières »

De fait, « *dans le cadre de la neurostimulation médullaire, la fréquence, l'amplitude et la durée des impulsions électriques générées par le neurostimulateur doivent être, après implantation du* »

2021

Essor de la neurostimulation
à distance aux États-UnisMars
2023Première programmation
à distance en France

Un intérêt également médico-économique... et écologique !

« La technique présente un intérêt pour le patient en réduisant ses déplacements à l'hôpital, mais également un intérêt médico-économique », relate le Dr Ouerchefani, neurochirurgien et spécialiste de la neurostimulation à distance au sein, notamment, de l'Hôpital européen de Paris. En effet, « si, en France, l'ensemble des patients stimulés médullaires étaient suivis à distance, cela pourrait faire économiser 6,6 millions d'euros par an à notre système de santé, en tenant compte de l'optimisation du temps de travail des soignants ainsi que de la réduction des frais de transports sanitaires, d'hébergements ou encore, d'arrêts de travail des personnes prises en charge », a-t-il calculé. « Une publication sur ce sujet est en cours », précise-t-il. Il a par ailleurs étudié l'impact de la neurostimulation à distance sur les émissions de dioxyde de carbone. « Cette technique permettrait de réduire la quantité de CO₂ émise de 1800 tonnes par an, soit l'équivalent de 1800 vols Francfort-New York ! »

dispositif, régulièrement ajustées. La première année, les patients viennent donc tous les trois mois à l'hôpital puis, la deuxième année, tous les six mois. Cela peut être contraignant pour des patients fragiles et douloureux chroniques », rappelle le Dr Ouerchefani. La possibilité d'effectuer ces réglages à distance est donc « un véritable confort proposé aux patients ».

D'ailleurs, « les patients, à leur domicile, sont plus détendus, observe-t-il. Certains nous proposent même une petite visite de leur salon ou de leur jardin, c'est très agréable (sourire). Les neurologues ou neurochirurgiens, quant à eux, peuvent effectuer en quelques minutes les réglages nécessaires, en fonction du ressenti des patients. En cas d'urgence, une consultation classique peut bien sûr être programmée ». Il y a « moins d'annulation de rendez-vous et le temps des soignants est optimisé », ajoute-t-il. En termes d'organisation, « une infirmière de neurostimulation, par ailleurs en charge de l'éducation thérapeutique des patients, se connecte cinq minutes en avance pour établir la connexion. Elle assiste ensuite à la téléconsultation, à mes côtés ».

Et demain ?

Aujourd'hui, plusieurs centres – en France mais aussi en Europe – ont recours à cette technique pour la stimulation médullaire, mais aussi pour la stimulation cérébrale profonde, dans le traitement de la maladie de Parkinson, du tremblement essentiel et des mouvements anormaux. « Il pourrait être intéressant de l'étendre à la stimulation du nerf vague, utilisée dans le traitement de l'épilepsie », évoque le Dr Ouerchefani.

Il faut dire que la neurostimulation à distance facilite le suivi des patients sur l'ensemble du territoire, y compris dans les Outre-Mer. C'est un véritable espoir pour les patients qui vivent éloignés des centres et des spécialistes qui proposent ces traitements... ainsi que pour ceux amenés à voyager. « Un jour, l'une de mes patientes, en déplacement loin de l'Hexagone, a fait une chute, relate le neurochirurgien. Elle a eu peur que son neurostimulateur ne soit endommagé et a donc sollicité un rendez-vous à distance. J'ai pu, en quelques minutes, m'assurer de l'intégrité de l'appareil. », conclut le Dr Ouerchefani.

LA NEUROLOGIE À L'ÈRE DE LA TÉLÉ- MÉDECINE

Au-delà de la neurostimulation à distance, la prise en charge à distance des patients se développe en neurologie grâce aux progrès de la télémédecine et à l'essor des objets connectés. Aperçu.

Téléconsultation, télé-assistance, télé-expertise, télésurveillance... Plusieurs pans de la télémédecine sont explorés en neurologie. L'enjeu ? Répondre aux besoins des patients et faciliter leur accès aux soins sur l'ensemble du territoire national, y compris dans les zones les plus reculées. Ainsi, la téléconsultation facilite-t-elle le suivi des patients atteints de sclérose en plaques ou de la maladie de Parkinson, par exemple, en leur évitant certains déplacements. Elle peut aussi s'avérer utile pour le renouvellement d'un traitement contre l'épilepsie ou pour les céphalées chroniques. Les patients étant à domicile et donc en milieu familial, certains diagnostics peuvent être affinés, notamment en neuropédiatrie, pour l'appréciation du développement (psychomoteur, cognitif, etc.) de l'enfant.

Chiffre clé

+ de
140 000


C'est le nombre de personnes victimes d'un AVC chaque année en France. Un cas est recensé toutes les quatre minutes. C'est la troisième cause de mortalité dans le pays – la première chez les femmes – et la première cause de handicap acquis.

Source: Inserm, 2025.

La téléneurologie... à très grande distance ?

La faisabilité des demandes d'avis neurologiques par e-mail a été démontrée en 2001 entre le Royaume-Uni et le Bangladesh pour 12 patients, puis pour deux cohortes de 74 et 76 patients au Royaume-Uni en 2003, selon une revue de littérature parue en septembre 2020 dans le *Journal of Neurology*. « *Des pratiques internationales ont été rapportées entre l'Afrique et l'Europe pour des patients avec VIH/SIDA (134 cas entre 2016 et 2018) et par Médecins Sans Frontières en crises humanitaires* », poursuit l'article. En Ontario (Canada), « *une étude sur 387 cas entre mai 2011 et janvier 2015 a identifié les céphalées comme premier motif (17 %), suivi de l'imagerie (11 %), des troubles de la sensibilité (11 %) et de l'épilepsie (9 %)* ». Au total, « *51 % des demandes concernaient le diagnostic et 23 % le traitement, la réponse prenait moins de 10 minutes dans 88 % des cas et a réduit l'adressage au spécialiste de 50 %* ». Des résultats prometteurs pour l'avenir.

Personnalisation des soins et réactivité

La télé-expertise, qui permet à un professionnel de santé (médecin généraliste, spécialiste, etc.) de demander un avis à distance à un neurologue pour l'interprétation d'un électroencéphalogramme , l'analyse de symptômes atypiques, ou encore la pose d'un diagnostic, est elle aussi de plus en plus plébiscitée. À la clé, un gain de temps pour le patient et moins de risques de perte de chances.

Des solutions de télé-surveillance sont pour leur part explorées, notamment pour le monitoring des patients atteints de la maladie de Parkinson. Des applications et autres objets connectés, certains ayant le statut de dispositif médical (DM), sont ainsi en cours de développement pour permettre aux professionnels de santé d'accéder, en temps réel, aux données collectées par les patients dans leur vie quotidienne : prises médicamenteuses comme intensité des symptômes (tremblements, phonation...).

Dans le même ordre d'idées, des études sont en cours concernant la prise en charge post-AVC, pour une détection précoce des troubles de l'humeur et une adaptation rapide du parcours de soins si nécessaire, afin de réduire le risque de dépression. Le service de neurologie et unité neuro-vasculaire (UNV) du CHU de Bordeaux collabore actuellement avec l'Institut de neurosciences cognitives et intégratives d'Aquitaine (INICIA) sur ce sujet.

En cas d'urgence

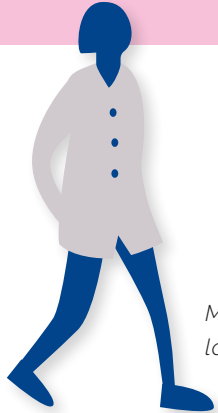
Enfin, la télémédecine présente un grand intérêt lorsque le temps presse, pour permettre aux soignants, quel que soit le lieu de prise en charge du patient, d'avoir accès à une expertise neurologique ou neurochirurgicale d'urgence. La prise en charge de l'accident vasculaire cérébral est, à ce titre, un très bel exemple.

« *Les traitements curatifs spécifiques, comme la thrombolyse, imposent des contraintes de temps (fenêtre thérapeutique courte) et des compétences spécifiques (...) nécessitant l'expertise neuro-vasculaire* », évoquent Elisabeth Medeiros de Bustos et consorts dans l'article « *Intérêt de la télémédecine pour les hôpitaux sans unité neurovasculaire* », paru en juin 2020 dans *La Revue du Praticien*. La télémédecine apparaît donc comme une belle opportunité en soutien des « *centres hospitaliers dépourvus de compétences neurovasculaire locales* », détaillent-ils.

L'essor de la « télé-AVC » faciliterait l'évaluation clinique du patient (téléconsultation), la discussion autour du partage de données biologiques et radiologiques (télé-expertise) et l'administration du traitement adéquat par délégation (télé-assistance). « *De nombreuses études ont pu montrer que la mise en place d'un réseau de télé-AVC augmentait les taux de thrombolyse à la phase aiguë des infarctus cérébraux avec la même efficacité et la même sécurité qu'en présentiel* », poursuivent les auteurs.

La neurostimulation, une véritable chance pour les patients douloureux chroniques

TÉMOIGNAGE PATIENT



Aujourd'hui âgée de 44 ans, Audrey Aronica souffre d'une algie vasculaire de la face et de névralgies d'Arnold et du trijumeau depuis huit ans. Des pathologies invisibles pour les autres, mais qui se traduisent par des douleurs d'une grande violence pour ceux qui en souffrent. En décembre 2023, l'implantation d'un neurostimulateur a changé sa vie.

Ma vie a basculé en janvier 2018, lorsque des douleurs violentes sont apparues à l'arrière de ma tête. La souffrance était telle que j'ai consulté rapidement mon médecin généraliste. Pourtant, malgré des consultations hebdomadaires, la douleur persistait. En février, je me suis rendue aux urgences tant la crise était violente. Mes symptômes ont été minimisés et attribués au stress et à la charge mentale de ma vie de femme et cheffe d'entreprise. Je suis repartie sans examen, avec des antidouleurs inefficaces et le sentiment de ne pas être entendue. C'est une double épreuve que de souffrir immensément et s'entendre dire qu'« il n'y a rien ».

A commencé une longue errance médicale, faite de consultations infructueuses auprès de divers spécialistes. J'ai compris à quel point ma situation était grave : une douleur extrême, invisible, mais

sans réponse médicale. Tout cela a eu des répercussions lourdes sur ma vie professionnelle, financière et familiale.

Face à l'isolement et à l'incompréhension, je me suis rapprochée de l'AFVD¹. Rencontrer des personnes vivant la même chose que moi a été un véritable soulagement. Nous partageons cette difficulté de devoir vivre avec et expliquer une souffrance invisible, permanente, souvent minimisée. Avec le temps, je suis devenue présidente de l'association. J'ai fait le choix de transformer cette douleur en une force : s'engager permet de tenir debout quand tout vacille.

Malgré des traitements médicamenteux, des infiltrations et une opération coûteuse en Suisse, les douleurs sont revenues, toujours plus violentes. Ce n'est qu'après des années que des diagnostics précis ont enfin été posés sur mes pathologies.

Au fil de ces années, j'ai fini par entendre parler

de la neurostimulation. Au départ, l'idée d'implanter un corps étranger dans mon organisme m'effrayait. Mais toutes les autres options avaient échoué et la douleur continuait de gouverner ma vie, alors j'ai sauté le pas. Le 5 décembre 2023, j'ai été implantée. Et je n'ai aucun regret !

Bien sûr, la neurostimulation n'est pas une solution miracle. Si elle a clairement mis en sommeil la névralgie d'Arnold, les douleurs du trijumeau et les crises d'algie persistent ; mais grâce au dispositif, elles ont perdu de leur violence et de leur fréquence. Avant l'implantation, je subissais jusqu'à dix crises par jour ; depuis, elles sont réduites à deux ou trois. Pour moi, la neurostimulation représente une véritable chance face à des douleurs chroniques sévères, là où les traitements médicamenteux seuls ne suffisent plus.

¹ - Association francophone pour vaincre les douleurs

A

AVC hémorragique

Accident vasculaire cérébral dû à la rupture d'un vaisseau avec saignement dans le cerveau.

AVC ischémique

Accident vasculaire cérébral causé par l'obstruction d'une artère cérébrale, privant une zone de sang.

B

Blister-like

Se dit d'un anévrisme très fragile, à paroi fine, souvent situé sur une artère intracrânienne.

C

Corticographie

Enregistrement de l'activité électrique du cortex cérébral à l'aide d'électrodes posées à sa surface.

Cyanoacrylate

Colle biologique utilisée en radiologie interventionnelle pour emboliser des vaisseaux.

D

Dyskinésies

Mouvements involontaires, anormaux et souvent incontrôlables, affectant un ou plusieurs groupes musculaires.

E

Électroencéphalogramme (EEG)

Examen qui enregistre l'activité électrique du cerveau.

Électrolytique

Relatif aux électrolytes (sodium, potassium...), ions essentiels au fonctionnement cellulaire et nerveux.

Électroneuromyographie (ENMG)

Examen évaluant l'activité électrique des nerfs et des muscles.

Électro-neurophysiologie

Discipline qui étudie le fonctionnement du système nerveux à l'aide de techniques d'enregistrement de l'activité électrique des nerfs, des muscles et du cerveau.

Électrophysiologie

Discipline qui étudie l'activité électrique des cellules, tissus et organes nerveux ou musculaires.

Espace épidural

Zone anatomique située entre la membrane externe entourant la moelle épinière – la dure-mère – et les vertèbres.

F

Fibrinolyse

Traitement visant à dissoudre un caillot sanguin par des médicaments.

Fusiforme

Se dit d'une dilatation vasculaire allongée touchant tout le diamètre du vaisseau.

L

Laminectomie

Intervention consistant à retirer une partie de la vertèbre appelée lame vertébrale, dans le but de décompresser la moelle épinière ou les racines nerveuses.

Leucodystrophie

Maladie génétique affectant la substance blanche du cerveau par atteinte de la myéline.

M

Maladie neurodégénérative

Affection caractérisée par la destruction progressive des neurones.

Métabolite

Substance issue du métabolisme d'une cellule ou d'un organisme.

Motoneurone

Neurone qui transmet les commandes motrices du système nerveux aux muscles.

Myasthénie

Maladie neuromusculaire entraînant une faiblesse musculaire fluctuante liée à un trouble de la jonction neuromusculaire.

Myéline

Substance lipidique et protidique complexe qui forme la gaine de certaines fibres nerveuses.

Myopathies

Ensemble de maladies affectant directement le muscle.

N**Néo-endothélisation**

Formation d'un nouvel endothélium recouvrant la paroi interne d'un vaisseau.

Névrose

Trouble psychique caractérisé par une souffrance mentale sans perte de contact avec la réalité.

P

PACS (*Picture Archiving and Communication System, ou système d'archivage et de transmission d'images*)

Système informatique permettant le stockage, la visualisation et le partage d'images médicales.

S**Sclérose latérale amyotrophique**

Maladie neurodégénérative touchant les motoneurons, entraînant une paralysie progressive.

Spectroscopie

Technique d'imagerie analysant la composition chimique des tissus.

T**Tenseur de diffusion**

Technique d'IRM qui étudie la diffusion de l'eau pour analyser les fibres de la substance blanche.

Thrombectomie

Procédure consistant à retirer mécaniquement un caillot d'un vaisseau afin de rétablir la circulation sanguine.

Tomodensitométrie

Technique d'imagerie utilisant les rayons X pour produire des images en coupes du corps (scanner).

Tomographie par émission de positons (TEP)

Imagerie fonctionnelle mesurant l'activité métabolique des tissus à l'aide de traceurs radioactifs.

Tomographie par émission monophotonique (TEMP)

Imagerie nucléaire évaluant la perfusion ou l'activité fonctionnelle d'un organe.

ARTICLES

M. Thonnard, M. Boly, M.-A. Bruno, C. Chatelle, O. Gosseries, S. Laureys, A. Vanhaudenhuyse, « *Imagerie et cognition : la neuro-imagerie - Un outil diagnostique des états de conscience altérée* », *Médecine / Sciences* n°1, vol. 27, janvier 2011

D. Khodagholy, G. G. Malliaras, « *Enregistrer l'activité unitaire des neurones sans pénétrer le cerveau* », *Médecine / Sciences* n°6-7, vol. 31, juin-juillet 2015

« *Une salle hybride de dernière génération au bloc opératoire* », *L'Américain*, n°82, American Hospital of Paris, printemps 2023

J. Burel, T. Agripnidis, A. Rouchaud, G. Marnat, J. Carroff, F. Zhu, B. Kerleroux, J. Berge, J.-P. Pruvo, H. Desal, G. Boulouis, « *Interventional neuroradiology in France in 2025: Scaling up expertise, access, and innovation* », *Journal of Neuroradiology*, vol. 52 (4), juin 2025

A. Calixte, S. Lartigue, S. McGaugh, M. Mathelier, A. Patel, M. R. Hosseini Siyanaki, K. Pierre, B. Lucke-Wold « *Neurointerventional radiology: History, Present and Future* », *Journal of Radiology and Oncology*, vol. 7 (2), juin 2023

A. Gabet, Y. Béjot, E. Touzé, F. Woimant, L. Suissa, C. Grave, G. Lallier, P. Tuppin, V. Olié « *Epidemiology of stroke in France* », *BEH Hors-série*, mars 2025

A. Laurent, L. Moine, « *Les nouveaux biomatériaux de l'embolisation - La grande révolution du dégradable* », *Médecine / Sciences* n°33, janvier 2017

M. Mazighi, « *La thrombectomie : la deuxième révolution dans le traitement de l'infarctus cérébral* », *Médecine Intensive Réanimation*, 24 (5), pp. 469-470, 2015

E. Shotar, M.D., B. Mathon, S. Lenck, L. Meyblum, V. Degos, K. Premat, N.-A. Sourour, F. Clarençon « *Embolisation des hématomes sous-duraux chroniques* », e-bulletin de la SFR, octobre 2019

K.-E. Matzel, U. Stadelmaier, M. Hohenfellner, F.-P. Gall, « *Electrical stimulation of sacral spinal nerves for treatment of fecal incontinence* », *The Lancet*, 1995

R. Dolhem, « *Histoire de l'électrostimulation en médecine et en rééducation* », *Annales de Réadaptation et de Médecine Physique*, vol. 51 (6), pp. 427-431, juillet 2008

P. Pollak, P. Burkhard, F. Vingerhoets, « *Stimulation cérébrale profonde : passé, présent et avenir* », *Rev Med Suisse*, vol. 11, n°472, pp. 958-961, 2015

S. Senova, C. Rabu, S. Beaumont, V. Michel, S. Palfi, L. Mallet, P. Domenech, « *Stimulation du nerf vague dans le traitement de la dépression* », *La Presse Médicale*, vol. 48, n°12, pp. 1507-1519, décembre 2019

S. Meoni, V. Fraix, E. Moro, « *Quoi de neuf en stimulation cérébrale profonde en 2020 ?* », *Pratique Neurologique*, vol. 11, n°2, pp. 122-128, avril 2020

E. Medeiros de Bustos, G. Charbonnier, B. Bouamra, T. Moulin, « *Intérêt de la télémédecine pour les hôpitaux sans unité neurovasculaire* », *La Revue du Praticien*, juin 2020

C. Cancalon, J. Chassetuillier, F. Bugnard, R. Duvillard, S. Bénard, « *Traitement de l'épilepsie par stimulation du nerf vague en France : évolution et caractéristiques des patients à partir des données de la base PMSI* », *Revue d'Épidémiologie et de Santé Publique*, vol. 68, supplément n°2, pp. S89-S90, septembre 2020

R. Ohannessian, E. De Bustos Medeiros, S. Deltour, T. Moulin, « *Télé-expertise en neurologie : revue de littérature* », *Journal of Neurology*, septembre 2020

E. Medeiros de Bustos, R. Ohannessian, B. Bouamra, T. Moulin, « *Rôle de la télémédecine dans les accidents vasculaires cérébraux* », *Bulletin de l'Académie nationale de médecine*, vol. 204, n°8, pp. 826-838, octobre 2020

B. W. Badran, C. W. Austelle, « *The Future is noninvasive: a brief review of the evolution and clinical utility of vagus nerve stimulation* », *Focus, American Psychiatric Association Publishing*, janvier 2022

M. Sgard, M. Deraeve, M. Dreano, A. Dormeuil, A. Petit, A. Gravier, H. Salhi, P. Remy « *Supports d'aide à la prise en charge à distance des consultations semi-urgentes de malades parkinsoniens* », *Revue Neurologique*, vol. 180, supplément, p. S20, avril 2024

A. Suller Marti, R. Verner, M. Keezer, A. Andrade, M. Veilleux, K. Myers, G. Giannicola, K. Nichol, J. G. Burneo, « *Reduction of generalized tonic-clonic seizures following vagus nerve stimulation therapy: CORE-VNS Study 24-month follow-up* », COREVNS Registry Group, *Epilepsia*, avril 2025

AVIS

« *Électrodes chirurgicales pour systèmes implantables de neurostimulation médullaire. Renouvellement et modification des conditions d'inscription* », Haute Autorité de santé (HAS), avis adopté par la Commission nationale d'évaluation des dispositifs médicaux et des technologies de santé le 8 novembre 2022

SITES INTERNET

CEA : www.cea.fr

Fondation pour la Recherche Médicale : www.frm.org/fr

Fondation Recherche Alzheimer : www.alzheimer-recherche.org/

AP-HP : www.aphp.fr

Hôpital Fondation Rothschild : www.fo-rothschild.fr/

Hôpital Universitaire Pitié Salpêtrière : <https://pitiealpetriere.aphp.fr/>

PRINCIPALES SOCIÉTÉS SAVANTES

Société française de neurologie (SFN)

Fédération française de neurologie (FFN)

Société française de neuroradiologie (SFNR)

Société française neuro-vasculaire (SFNV)

Société française de neuromodulation (SFNM)

Société française de neurologie comportementale (SFNC)

Société française de neuropédiatrie (SFNP)

REMERCIEMENTS

Nadine Aknin, Medical Science Liaison Manager Europe, Moyen-Orient et Afrique, Sirtex Medical

Audrey Aronica, présidente de l'Association francophone pour vaincre les douleurs (AFVD)

Pr Jean-Philippe Azulay, past-président de la Société française de neurologie et président de la Société francophone des mouvements normaux (SOFMA)

D^r Benjamin Bardel, neurologue au sein de l'unité de neurophysiologie clinique de l'hôpital Henri-Mondor (AP-HP), Créteil

Caroline Beaugrand, Responsable marketing Neurovasculaire hémorragique et ischémique, Stryker France

Jean-François Casteret, chef de produit Neuromodulation France, Boston Scientific

D^r Nicole Chemaly, neuropédiatre à l'hôpital Necker-Enfants malades (AP-HP), Paris

Pr Frédéric Clarençon, chef d'unité fonctionnelle de neuroradiologie interventionnelle à la Pitié-Salpêtrière (AP-HP), Paris

Nolwenn Clément-Rio, Reimbursement & Health Economics Manager – France & BeNeLux, Penumbra France SAS

Caroline Courtois, chef de produit stimulation cérébrale profonde - Neuromodulation – France, Boston Scientific

Pr Emmanuel Cuny, neurochirurgien au sein du CHU de Bordeaux

Pr Hubert Desal, past-président de la SNFR, chef du service de neuroradiologie diagnostique et interventionnelle du CHU de Nantes

D^r Denis Dupouiron, Anesthésiste à l'Institut de cancérologie de l'Ouest – site Paul Papin

D^r Manon Durauffourg, neurochirurgienne et médecin de la douleur au sein des Hospices Civils de Lyon

Céline Fattet, responsable commercial Neuromodulation – France, LivaNova

Pr Damien Galanaud, spécialiste en neurodiagnostic et neuroradiologie à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière (AP-HP), Paris

Andres Gamez, Market Access Manager – EMEA, Terumo Neuro Europe, MicroVenton Europe SARL

D^r Grégory Gascou, neuroradiologue au CHU de Montpellier

Maëva Ginoux, chef de produit Neuromodulation, LivaNova

Thomas Grossmann, Market Director France, Diagnostic X-Ray and Interventional Imaging Business Unit, Canon Medical Systems France

Estelle Ibbá, responsable marketing Neuromodulation France, Abbott

Thierry Lagadec, responsable développement Radiofréquence – Neuromodulation France, Abbott

Pr Jean-Pascal Lefaucheur, neurologue et responsable de l'unité de neurophysiologie à la clinique de l'hôpital Henri-Mondor (AP-HP), Créteil

D^r Thierry Maisonobe, responsable de l'unité électroneuromyographie à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière (AP-HP), Paris

Pr Fanny Mochel, généticienne et médecin-chercheuse, travaille sur ces pathologies dans le cadre de deux centres de référence nationaux maladies rares (CRMR leucodystrophies et CRMR maladies neurométaboliques)

D^r Naoufel Querchefani, neurochirurgien et spécialiste de la neurostimulation à distance au sein de l'Hôpital européen de Paris, Aubervilliers

D^r Michel Piotin, chef du service de neuroradiologie interventionnelle de l'Hôpital Fondation Rothschild

Pr Jean-Pierre Pruvo, Professeur des universités, CHU de Lille, Président de la Société française de neuroradiologie, past Président de la Société française de radiologie

Pr Louis Puybasset, chef de l'unité de réanimation chirurgicale de l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière (AP-HP), Paris

D^r Cyril Quemeneur, médecin anesthésiste-réanimateur et médecin algologue au sein de l'hôpital Raymond-Poincaré (AH-HP), Garches, et de la clinique Drouot Sport & Arthrose, Paris

Julie Rachline, fondatrice et CEO, LallianSe

Fabienne Santini, International Sales Manager, Penumbra Inc.

Pr Laurent Spelle, chef de centre NEURI à l'hôpital Bicêtre (AP-HP), Paris

Pr Sébastien Soize, neuroradiologue au CHU de Reims

Dorothee Uriet, Directrice du développement clinique et de la pratique, RebrAln

AIDE A LA PRÉVENTION DES ESCARRES	ANESTHÉSIE - RÉANIMATION	APPAREIL DIGESTIF	AUDIOLOGIE	CARDIOLOGIE	CONTACTOLOGIE
DIABÈTE	DIALYSE	HANDICAP MOTEUR	IMAGERIE	INJECTION - PERFUSION	NEUROLOGIE
NUMÉRIQUE EN SANTÉ	ONCOLOGIE	OPHTALMOLOGIE	ORTHÈSES	ORTHOPÉDIE	PATHOLOGIES VEINO-LYMPHATIQUES
PLAIES ET CICATRISATION	RESPIRATION	ROBOTIQUE	SANTÉ BUCCO- DENTAIRE	SANTÉ DE LA FEMME	UROLOGIE

Tous les livrets sont téléchargeables sur le site du Snitem : www.snitem.fr



Quand l'épopée de l'innovation
des dispositifs médicaux
se confond avec l'extraordinaire
histoire de la neurologie.

SNITEM

CS 30080 – 92038 Paris - La Défense cedex

Tél. : 01 47 17 63 88

www.snitem.fr

info@snitem.fr

 @snitem

