



HAL
open science

L'imagerie cérébrale au service de la rééducation

Claire Cury, Isabelle Bonan, Anatole Lécuyer, Giulia Lioi

► **To cite this version:**

Claire Cury, Isabelle Bonan, Anatole Lécuyer, Giulia Lioi. L'imagerie cérébrale au service de la rééducation. Le corps en images : Les nouvelles imagerie pour la santé, 2022. hal-03690524

HAL Id: hal-03690524

<https://hal.inria.fr/hal-03690524>

Submitted on 8 Jun 2022

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

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

et des méthodes de reconstructions avancées. L'ISRM est reconnue comme une technique à fort impact pour la recherche sur le métabolisme et la neurologie, et les recherches s'appliquent à la rendre facilement applicable en routine clinique.

6 Conclusion

De toutes les techniques d'imagerie spectrale biomédicales citées dans cet article, ce sont probablement la tomodensitométrie* double énergie et l'imagerie spectroscopique de résonance magnétique, notamment pour l'évaluation du cancer pour cette dernière, qui ont le plus intégré les examens cliniques de routine.

Toutes ces techniques doivent cependant encore être développées et validées par la recherche en imagerie biomédicale pour améliorer leur résolution spatiale, précision, fiabilité, reproductibilité et facilité de mise en œuvre. Avec le concours des industriels et des médecins pour fixer les conditions de leurs adoptions, ces techniques pourraient finalement, à plus long terme, être transférées plus largement en routine clinique.

L'IMAGERIE CÉRÉBRALE AU SERVICE DE LA RÉÉDUCATION

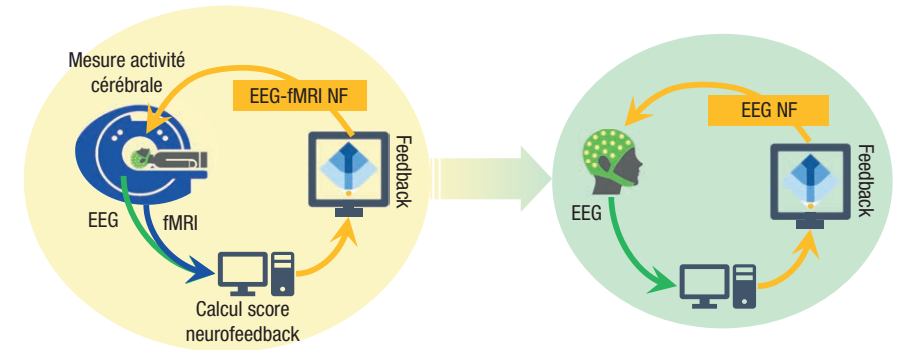
par Claire Cury, Isabelle Bonan, Anatole Lécuyer et Giulia Lioi

Un *biofeedback* (ou « rétroaction biologique » en français) est un retour sensoriel qui nous informe sur l'impact de nos actions, qui nous permet de nous entraîner et d'apprendre. Par exemple, pour apprendre à jouer d'un instrument de musique, nous répétons le même morceau plusieurs fois jusqu'à être satisfait de notre performance. Le *neurofeedback* est un biofeedback utilisant des mesures cérébrales pour entraîner le cerveau à une tâche spécifique via une interface cerveau-machine*. Celle-ci mesure l'activité cérébrale d'un sujet et restitue en temps réel cette mesure sous forme d'un « score *neurofeedback* », qui est retourné au sujet de manière sensorielle, par un signal visuel (une jauge qui monte ou qui descend est affichée à l'écran) ou auditif. L'objectif de l'entraînement par *neurofeedback* est d'aider le sujet à réguler sa propre activité cérébrale. Le *neurofeedback* représente une alternative innovante aux traitements traditionnels et/ou pharmacologiques pour la rééducation du système nerveux central, comme dans le cas des accidents vasculaires cérébraux (encart 1).

ENCART 1 - LA RÉÉDUCATION DU MEMBRE SUPÉRIEUR APRÈS AVC

L'Accident Vasculaire Cérébral (AVC) est une pathologie extrêmement fréquente, avec environ 150 000 cas par an en France (1 AVC toutes les 4 minutes). Il s'agit de la première cause de handicap acquis de l'adulte. La forme la plus habituelle d'AVC est le déficit d'un hémicorps* qui reste très souvent plus sévère au niveau du membre supérieur. Les 2 facteurs majeurs pronostiques de récupération pour le membre supérieur sont : l'intensité initiale du déficit moteur et l'épargne corticospinale du faisceau pyramidal (axones* moteurs du cortex vers la moelle épinière (figure 5). La récupération au membre supérieur est moins bonne qu'au membre inférieur en raison de la dépendance quasi exclusive de la motricité du membre supérieur vis-à-vis du faisceau pyramidal, alors que pour le membre inférieur d'autres circuits moteur moins spécialisés peuvent venir en compensation. La récupération du membre supérieur étant cruciale pour la récupération d'une bonne autonomie, une partie importante de la rééducation après AVC est consacrée à sa récupération. Pendant longtemps, la rééducation du membre supérieur consistait uniquement à des exercices de mobilisation du membre supérieur, pendant des tâches de préhension de difficulté croissante adaptées au déficit moteur du patient. On sait depuis les années 1990 que pour être efficaces, ces exercices doivent obéir aux règles générales d'apprentissage. Le programme doit être intense, les exercices doivent être répétés, avoir du sens pour le patient et être motivants. Le *biofeedback* (ou « rétroaction ») qui donne un retour au patient sur sa performance est un bon moyen de susciter la motivation, de même que l'immersion dans un environnement virtuel. De plus, les connaissances nouvellement acquises, notamment grâce à l'imagerie cérébrale fonctionnelle, ont suscité d'autres techniques de rééducation innovantes. Des études ont montré dans le cerveau du singe, puis dans le cerveau humain, la diminution de la représentation du membre supérieur au sein du cortex moteur suite à la non-utilisation acquise du membre supérieur paralysé. Ce constat a conduit à proposer la technique dite « de contrainte induite » visant à forcer l'utilisation du membre supérieur. On a aussi visualisé en IRM fonctionnelle que, indépendamment de la réalisation d'un vrai mouvement par la main paralysée, l'imagerie motrice (imaginer le mouvement de sa main paralysée), et même l'observation d'un mouvement par une tierce personne ou encore le mouvement de la main saine reflétée dans un miroir et interprété par le sujet comme un mouvement de sa main paralysée (miroir thérapie), activent les régions motrices lésées du cerveau. On connaît maintenant mieux les zones du cerveau les plus favorables à une récupération de bonne qualité ainsi que l'incidence de la compétition entre les 2 hémisphères.

Le premier module d'une boucle d'entraînement *neurofeedback* est la mesure de l'activité cérébrale (figure 1). Avec environ 1 billion de neurones* (10^{12}) et 1 milliard de connexions synaptiques (10^{15}) envoyant et recevant 1 trillion d'informations (10^{18}) par seconde, le cerveau humain est un organe d'une incroyable complexité. La mesure de l'activité cérébrale est donc par-



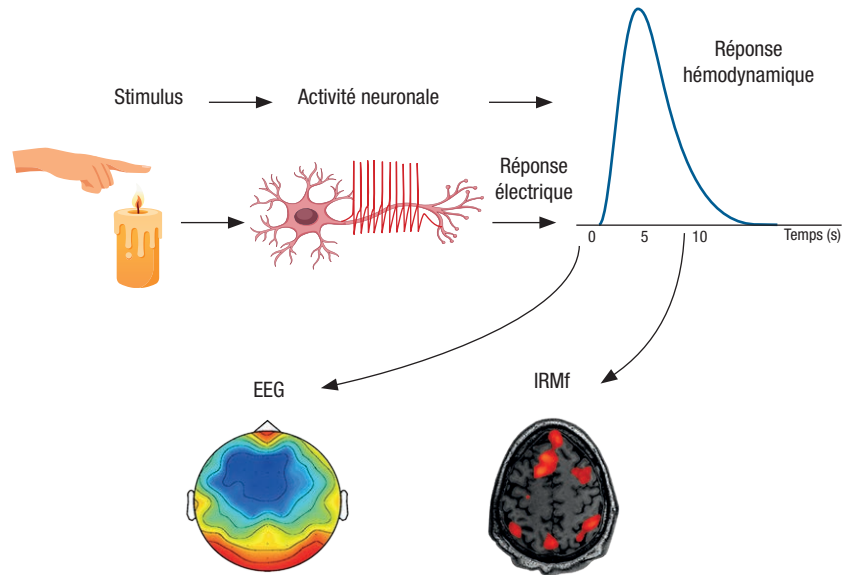
1. Boucle neurofeedback, bimodale à gauche et EEG seule à droite.

ticulièrement difficile, et il existe plusieurs modalités de neuro-imagerie mesurant différents aspects de cette activité cérébrale. Nous présentons ici deux de ces modalités : l'électroencéphalogramme (EEG), qui est une mesure non invasive de l'activité électrique du cerveau; et l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle* (IRMf), qui est une mesure indirecte de l'activité cérébrale liée à la demande métabolique des neurones activés dans l'exécution d'une tâche ou la présentation d'un stimulus.

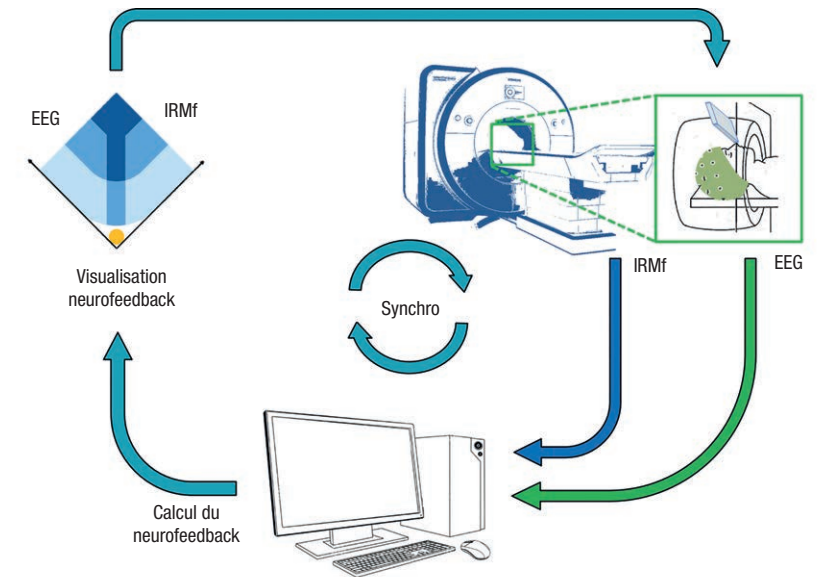
Pour l'IRMf, la réponse hémodynamique* (variation locale du débit sanguin) de l'activité neuronale est beaucoup plus lente que l'activité électrique (relevée par l'EEG), qui se produit quelques secondes après la stimulation réelle (figure 2), ce qui limite la résolution temporelle de cette technique. Mais sa résolution spatiale permet de localiser plus précisément les sources de l'activité neuronale et d'accéder à des structures du cerveau plus profondes, alors que l'EEG est limité au cortex superficiel. La possibilité de mesurer en temps réel l'activité de régions profondes du cerveau liées à des fonctions complexes telles que les émotions ou la mémoire est essentielle pour des applications cliniques telles que le traitement de la dépression. L'EEG et l'IRMf sont donc des techniques de neuroimagerie fortement complémentaires, leur intégration pouvant fournir à la fois une haute résolution spatiale et temporelle et une bonne « couverture » du cerveau. L'IRMf nous dit précisément « où », tandis que l'EEG nous dit « quand ».

1 Le projet HEMISFER

L'esprit visionnaire de Christian Barillot, qui comprit très tôt le changement de paradigme introduit par le concept de *neurofeedback* pour les technologies de neuro-imagerie, est à l'origine du projet HEMISFER. Il avait anticipé la transformation de la neuro-imagerie, initialement utilisée à des fins d'investigation et de diagnostic, en véritable dispositif thérapeutique. Il avait également prédit que les progrès des techniques de neuroimagerie appliqués au *neurofeedback* permettraient au patient de mieux rentrer dans un processus d'apprentissage, pour prendre progressivement le contrôle de son activité cérébrale. Son objectif était donc de poser les fondements théoriques et pratiques de nouvelles approches numériques visant à intégrer des techniques de neuroimagerie complémentaires, telles que l'EEG et l'IRMf pour une rééducation directe et plus spécifique du cerveau, afin de



2. Mesures de l'activité cérébrale en EEG et IRMf.



3. Les unités d'acquisition EEG et IRMf sont reliées à l'unité de contrôle *neurofeedback* responsable du prétraitement des signaux EEG et IRMf et du calcul du score *neurofeedback*. L'unité de contrôle est également responsable de l'exécution du protocole expérimental : cela comprend le démarrage/arrêt de l'expérience, la synchronisation entre les différentes unités d'acquisition de données et la présentation du *neurofeedback*, au moyen d'un écran compatible avec l'IRM positionné à l'arrière du tube de l'IRM et d'un miroir orienté vers l'arrière.

pouvoir traiter des accidents vasculaires cérébraux (AVC) ou des dépressions chroniques.

L'objectif du projet HEMISFER est d'abord d'accéder à une activité cérébrale très précise du patient en se basant sur les informations provenant de l'IRM, pour pouvoir ensuite entraîner des modèles de *neurofeedback* capables de fonctionner de manière autonome avec de l'EEG seul. Le projet est articulé autour de quatre défis scientifiques majeurs : construire une plateforme de *neurofeedback* bimodal EEG-IRMf en temps-réel ; concevoir des nouveaux paradigmes de *neurofeedback* ; proposer un apprentissage par intelligence artificielle de modèles couplant l'EEG et l'IRMf ; et enfin exploiter à terme le

modèle mathématique appris pour réaliser un *neurofeedback* « augmenté » sous EEG seul en service de rééducation, voire à la maison.

2 Mise au point de la plateforme

Un des premiers défis du projet HEMISFER a été de concevoir et implémenter une plateforme pour le *neurofeedback* bimodal. Ce système unique, développé à la plateforme d'imagerie Neurinfo du CHU de Rennes, permet de mesurer et traiter en temps réel les données EEG et IRMf et de les restituer au sujet sous forme de retour visuel. Pour réussir l'implémentation simultanée et en temps réel de l'EEG et de l'IRMf, il a fallu faire face à une série de défis techniques et pratiques. En effet, l'IRM est un environnement très hostile pour certains objets: le champ magnétique statique très élevé et les champs magnétiques variables comportent une série de risques pour les équipements se trouvant à proximité de l'IRM. Les objets ferromagnétiques ou les matériaux conducteurs peuvent être attirés par le champ magnétique et se transformer en projectiles, ou être soumis à d'importants échauffements. Un système EEG constitué de matériaux compatibles avec l'IRM et un logiciel plus sophistiqué sont donc nécessaires pour l'acquisition simultanée EEG et IRMf (figure 3).

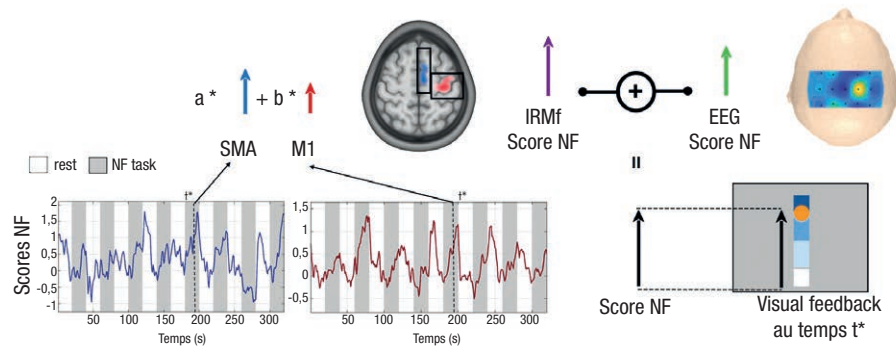
En outre, lors de l'enregistrement de l'EEG à l'intérieur d'un scanner IRM, l'EEG est perturbé par de forts artefacts* dus aux rapides variations du champ magnétique qui peuvent sérieusement compromettre la qualité des signaux EEG et être difficiles à supprimer, surtout en temps réel. Afin d'obtenir des enregistrements EEG de bonne qualité dans le scanner MR, une préparation minutieuse est nécessaire pour réduire l'impédance* des électrodes EEG. Chaque détail est important pour s'assurer que le sujet est confortablement installé dans le scanner IRM avec son bonnet EEG et prêt à se concentrer sur son entraînement *neurofeedback*. Une chaîne de prétraitements sophistiqués pour réduire les artefacts* EEG induits par l'IRM en temps réel et un contrôle continu de la qualité des données sont implémentés avant le traitement ultérieur des données et le calcul de scores *neurofeedback*.

La plateforme de *neurofeedback* bimodal a d'abord été testée sur une population de volontaires sains et pour une tâche d'imagination de mouvement (imagerie motrice), afin de tester la faisabilité et l'efficacité du *neurofeedback* bimodal (EEG-IRMf) par rapport au *neurofeedback* unimodal (EEG ou IRMf). Différents retours visuels de *neurofeedback* ont également été testés. Une balle se déplaçant sur une jauge monodimensionnelle de façon proportionnelle à la moyenne des activités EEG et IRMf dans les régions motrices cibles a été sélectionnée pour les études cliniques qui ont suivi, car engageante et facile à contrôler.

3 Tests pour le traitement des AVC

Après avoir testé le protocole de *neurofeedback* bimodal sur des volontaires sains, nous avons étudié son efficacité pour la récupération motrice du membre supérieur de patients victimes d'AVC. Pendant l'entraînement *neurofeedback*, les patients sont appelés à effectuer une tâche d'imagerie motrice du membre atteint (le patient imagine un mouvement du membre supérieur, sans l'exécuter) pour sur-réguler le cortex moteur périlésionnel* (autour de la lésion), à l'aide d'un retour visuel en forme de jauge. L'imagerie motrice mobilise des régions et des circuits moteurs similaires à ceux de l'exécution du mouvement et est une technique prometteuse dans la rééducation motrice après AVC en complément d'une thérapie physique (encart 2). L'intérêt du *neurofeedback* est de conforter le patient pendant la tâche sur l'activation des zones motrices périlésionnelles considérées comme étant les plus adéquates pour une récupération optimale.

Le choix des régions cibles est crucial lors de la conception d'un protocole de *neurofeedback*. Dans le cas de la réhabilitation AVC, de nombreuses études suggèrent que la stimulation de l'activité dans le cortex moteur primaire (M1) ipsilésionnel* (du même côté de la lésion) pourrait représenter la meilleure cible, mais chez les patients plus sévèrement touchés, l'aire motrice supplémentaire (SMA) pourrait être une alternative utile pour restaurer la fonction motrice. De plus, il est plus facile d'activer la SMA que la M1 pendant une tâche d'imagerie motrice. Sur ces bases, nous avons proposé une stratégie qui récompense d'abord fortement l'activation de l'aire



4. Cibles neurofeedback EEG et IRMf et calcul du score *neurofeedback*. Dans notre expérimentation, pour le calcul du score *neurofeedback* EEG, une combinaison individualisée optimale d'électrodes parmi les 18 électrodes correspondant aux régions motrices bilatérales est sélectionnée et la désynchronisation liée à l'événement* obtenue à partir de ces électrodes est calculée. La combinaison optimale d'électrodes ainsi que les régions SMA et M1 sont identifiées dans une session dite de calibration qui précède le véritable entraînement neurofeedback. Pendant cette session de calibration le patient effectue une tâche d'imagerie motrice sans feedback. Les données de calibration sont traitées juste avant le début des sessions neurofeedback, pour chaque patient afin d'identifier des cibles optimales et adaptées au patient. Elles sont ensuite utilisées pour le calcul du score neurofeedback renvoyé en temps réel au patient pendant l'entraînement.

motrice supplémentaire lors de la première session d'entraînement *neurofeedback*, puis qui récompense plus fortement la contribution du cortex moteur primaire ipsilésionnel lors de la session finale. Cette stratégie a été conçue pour accompagner le patient dans l'autorégulation de l'activité cérébrale ipsilésionnelle de façon que la réhabilitation de son membre supérieur soit plus simple au début de l'entraînement et qu'il puisse explorer différentes stratégies d'imagerie motrice au cours de l'entraînement (figure 4).

ENCART 2 - PLASTICITÉ CÉRÉBRALE APRÈS AVC

La carte motrice de chaque hémicorps* est située au sein du cortex frontal de l'hémisphère opposé et correspond à la cartographie de la commande motrice de chaque élément de l'hémicorps. Quand on exerce intensément une partie de son corps, comme la main pour un musicien ou un sportif, non seulement on améliore sa dextérité manuelle, mais la plasticité cérébrale fait que la zone du cerveau normalement dévolue à la commande de la main s'hypertrophie, et inversement si on arrête son entraînement. Les premières études menées dans les années 1990 en IRM fonctionnelle après survenue d'un AVC responsable de lésions de région motrices du cerveau ont montré l'activation des zones motrices de l'hémisphère non lésé. On a donc pensé pendant quelques années que la récupération était assurée par l'hémisphère sain. Mais les études suivantes ont montré qu'après un AVC, il existait des changements d'activation au cours du temps avec une première phase d'activation dans l'hémisphère sain puis dans un second temps une re-latéralisation des activations dans l'hémisphère lésé. On a alors fait l'hypothèse d'une compétition interhémisphérique responsable d'une inhibition de l'hémisphère lésé par l'hémisphère sain. On pense encore actuellement que l'inhibition exercée par l'hémisphère sain, si elle n'est pas levée, pourrait conduire à une plasticité dite « mal adaptée » avec une sous exploitation des possibilités de récupération. Mais le schéma de récupération n'est pas univoque, plusieurs cas de figure sont possibles selon la localisation et l'étendue de la lésion et les antécédents cérébraux. Dans le cas de toutes petites lésions, une certaine plasticité à l'échelle neuronale ou régionale voisine peut s'effectuer. Les dendrites des neurones* déficients peuvent s'articuler avec ceux des neurones vivants, et les zones adjacentes à de petites zones lésées pourraient relayer l'activité des zones lésées. Mais quand la lésion est trop grosse ou dans des zones cruciales pour la motricité, alors la plasticité doit recruter l'activation de zones périlésionnelles plus larges, antérieures (zones prémotrices), postérieure (sensitive) ou contralésionnelles pour suppléer à la fonction perdue.

4 Vers un neurofeedback enrichi en EEG seul

Un des objectifs de ce projet est de réussir à optimiser puis de réduire à long terme l'utilisation de l'IRM, pour plusieurs raisons. Tout d'abord, l'utilisation de l'IRM est coûteuse et contraignante (rester parfaitement immobile pendant plusieurs minutes est inconfortable, surtout lorsque le patient souffre d'une hémiplegie). Les machines IRM sont aussi difficiles d'accès et ne sont présentes que dans les grandes villes de pays riches, et sont souvent surchargées. Deuxièmement, certaines personnes ne peuvent entrer dans l'IRM du fait de la présence de pacemaker ou d'implants métalliques, limitant l'accès à ce soin prometteur à bon nombre de patients. L'électroencéphalogramme étant beaucoup moins onéreux et plus facile d'utilisation, nous proposons de

recourir à un *neurofeedback* EEG, mais enrichi par les informations extraites pendant les sessions bimodales préalables utilisant les deux modalités, IRM et EEG. L'objectif est donc de tendre vers une utilisation principale, voire unique, de l'EEG, afin de rendre la rééducation par *neurofeedback* accessible à tous.

Pendant, extraire de l'information d'une modalité d'imagerie avec une autre est très difficile du fait de la complexité de ces signaux. En se basant sur la plateforme de *neurofeedback* bimodal, nous avons décidé de nous intéresser directement aux scores *neurofeedback*. Le modèle proposé prend en entrée les signaux EEG d'une session de *neurofeedback*, et les scores *neurofeedback* IRMf de cette même session. Les signaux EEG sont transformés en un cube de données réparties suivant les axes espace (électrodes) / temps / fréquences. Plusieurs délais temporels de trois, quatre et cinq secondes, sont induits sur ce premier cube de données pour en former 3 supplémentaires, en utilisant la fonction de la réponse hémodynamique* qui représente l'évolution du débit sanguin après une activité cérébrale. Ces délais temporels permettent au modèle de se rapprocher le plus possible des scores *neurofeedback* IRMf. Partant de l'hypothèse que seuls quelques électrodes et quelques groupes de bandes de fréquences sont impliqués dans la modélisation des scores *neurofeedback* IRMf, nous avons ajouté deux contraintes au modèle allant dans ce sens.

Le modèle a été développé sur des données de sujets sains, acquises à la plateforme Neurinfo, lors de sessions *neurofeedback* avec tâche d'imagerie motrice. Cette étude innovante est prometteuse puisque nous avons montré, avec ce modèle interprétable et contrôlable, qu'il est possible de prédire des scores *neurofeedback* IRMf d'un participant en utilisant seulement ces signaux EEG.

5 Résultat

Le protocole de *neurofeedback* combiné EEG-IRMf a été conçu pour être réalisable en pratique de rééducation courante tout en utilisant une technique de *neurofeedback* très sophistiquée. Les séances bimodales sont relayées par des sessions unimodales EEG réalisables dans le service de rééducation, dans l'hypothèse qu'elles soient « augmentées » par des séances bimodales réintroduites régulièrement pour maintenir la qualité du *neurofeedback*. L'autre caractéristique originale est de modifier petit à petit la cible à activer tout

au long des séances, commençant par SMA et allant vers M1, en modifiant la contribution de chacune de ces régions dans la récompense (score *neurofeedback*). Le patient doit alors stimuler en premier la région SMA qui est plus facile à activer en imagerie motrice et en général épargnée par la lésion cérébrale, avant d'être progressivement amené à stimuler M1, qui est la cible la plus efficace en termes de récupération.

Pour tester sa faisabilité, nous avons d'abord conçu un protocole court de cinq séances (deux séances bimodales encadrant trois séances unimodales en EEG) et l'avons testé sur quatre patients dont l'AVC chronique était de sévérité assez différente. Nous avons mesuré la différence d'activation en IRMf et en EEG de SMA et M1 entre la dernière et la première séance. Les résultats de cette étude pilote ont montré la faisabilité du protocole avec, pour les quatre patients, une activation de SMA et de M1. Deux des patients ont réussi à augmenter l'activation de la région M1 après les cinq séances, et ont ainsi amélioré la motricité de leur membre supérieur déficitaire. Ces deux patients avaient un faisceau corticospinal préservé alors que les deux autres non.

Nous avons ensuite mené une étude aléatoire contrôlée en alternant des sessions bimodales et unimodales, et une progression de la cible SMA vers M1. Cette étude a été conduite sur des patients souffrants d'AVC chronique, et présentant un certain niveau de récupération du membre supérieur et un faisceau corticospinal en grande partie préservé. Cet essai comprend un groupe interventionnel comportant une série de cinq séances bimodales entrecoupées de neuf séances unimodales versus un groupe contrôle ne pratiquant que de l'imagerie motrice sans feedback sur les régions activées pendant l'exercice. L'étude est en cours, et le protocole est apprécié des participants bien que demandant un haut niveau de concentration. L'amélioration du contrôle moteur est le critère principal. Nous évaluons aussi les changements d'activations cérébrales obtenus à l'issue du protocole de rééducation dans le groupe interventionnel versus contrôle.

6 Perspectives

Ce projet a permis d'exploiter le concept du *neurofeedback* et les technologies du numérique pour stimuler le cerveau à des fins curatives pour

la rééducation motrice cérébrale. HEMISFER a aussi permis de relever différents défis scientifiques, comme le développement d'une des premières technologies au monde permettant de synchroniser les signaux EEG et IRMf, ainsi que les scores *neurofeedback* issus de chacune des modalités, la conception de nouveaux paradigmes de *neurofeedback*, et le développement de modèles d'apprentissage du couplage de l'activité cérébrale pour améliorer le *neurofeedback* en EEG seul.

Les applications et perspectives de ce projet sont nombreuses, notamment pour les pathologies psychiatriques comme la dépression dont souffrent plus de 300 millions de personnes dans le monde. Environ un tiers des patients souffrant de troubles dépressifs majeurs ne répondent pas aux traitements disponibles, 60 % des patients rechutent après le premier épisode et 90 % après le troisième épisode. Il est donc important de pouvoir proposer un nouveau traitement à ces patients.

Comme dit dans l'introduction, il existe différentes modalités d'imagerie permettant de mesurer l'activité cérébrale, parmi celles-ci il existe aussi l'imagerie spectroscopique proche infrarouge (fNIRS), qui permet de mesurer l'activité vasculaire du cortex cérébral, en réponse à une activité neurale. C'est une modalité portable comme l'EEG, fournissant des informations similaires à celles de l'IRMf, mais seulement en surface. L'utilisation de la fNIRS pourrait aider à démocratiser l'utilisation des systèmes de *neurofeedback* fiables. Les recherches sur des méthodes permettant d'extraire de l'information venant de l'IRM fonctionnelle en utilisant les signaux EEG vont être poursuivies pour pouvoir réduire l'utilisation de l'IRMf, technique lourde et coûteuse.

Enfin, la recherche de cibles (zones cérébrales ou réseaux fonctionnels) de *neurofeedback* en EEG et IRMf sera aussi poursuivie, pour mieux cibler la rééducation du patient. En effet, de nos jours, les cibles manquent de précision, car elles ne prennent pas en compte la particularité de chaque participant ni ses progrès individuels au cours de la rééducation, du fait de la complexité des signaux et images à traiter en temps réel. Les développements de ce projet amèneront vers un *neurofeedback* portable et personnalisé, pour une utilisation plus facile et efficace en clinique et pour un plus large éventail de pathologies.

GESTES MÉDICO-CHIRURGICAUX ASSISTÉS PAR L'IMAGE

par Jocelyne Troccaz et Sandrine Voros

L'imagerie interventionnelle est une branche de l'imagerie médicale dédiée à la réalisation mini-invasive de gestes diagnostiques ou thérapeutiques. Ces actes ont pour objectif de réaliser des prélèvements sanguins ou tissulaires (lors d'une biopsie, par exemple) ou bien d'introduire dans le corps des médicaments ou des dispositifs médicaux (comme un stent* dans une artère). Destinée à guider le geste en temps réel, l'imagerie interventionnelle privilégie les modalités « dynamiques », permettant au médecin de voir les instruments et l'anatomie du patient simultanément sur une même image, afin de contrôler la progression de son geste. Moins le geste est invasif, c'est-à-dire plus les voies d'abord sont restreintes, plus le rôle de l'imagerie est important pour garantir sa précision, son efficacité et sa sécurité. Différents professionnels de la santé réalisent des actes sous imagerie interventionnelle : radiologues, chirurgiens, rhumatologues, cardiologues, urgentistes, anesthésistes-réanimateurs, etc.

Ces images sont obtenues *via* différents phénomènes physiques : propagation des rayons X* pour les radios ou pour la tomographie (scanner),