



Extrait du L'encyclopédie neurochirurgicale

<https://www.neurochirurgica.org/spip.php?article10>

# Cartographie cérébrale fonctionnelle par stimulation électrique directe cortico-sous-corticale per-opératoire

Date de mise en ligne : mercredi 9 avril 2014

- Techniques chirurgicales -

## **Description :**

La stimulation électrique directe est aujourd'hui l'outil de référence pour réaliser la cartographie cérébrale fonctionnelle, notamment en chirurgie éveillée en zone éloquente. Dans ce chapitre, l'intérêt, les indications, et les limites de cette technique sont discutés au regard des connaissances neuro-anatomiques fonctionnelles et neuro-physiologiques actuelles.

La principale indication de la stimulation électrique directe est la chirurgie éveillée des gliomes de bas grade mais son utilisation peut également être discutée pour la chirurgie des gliomes malins, de l'épilepsie et pour d'autres types de lésions tumorales. Les écueils de la technique, les risques de faux négatifs et de faux positifs sont exposés.

L'encyclopédie neurochirurgicale

## Résumé

La stimulation électrique directe est aujourd'hui l'outil de référence pour réaliser la cartographie cérébrale fonctionnelle, notamment en chirurgie éveillée en zone éloquente. Dans ce chapitre, l'intérêt, les indications, et les limites de cette technique sont discutés au regard des connaissances neuro-anatomiques fonctionnelles et neuro-physiologiques actuelles.

La principale indication de la stimulation électrique directe est la chirurgie éveillée des gliomes de bas grade mais son utilisation peut également être discutée pour la chirurgie des gliomes malins, de l'épilepsie et pour d'autres types de lésions tumorales. Les écueils de la technique, les risques de faux négatifs et de faux positifs sont exposés.

## I. Introduction

La stimulation électrique directe (SED) est considérée aujourd'hui comme l'outil "gold-standard" pour cartographier les fonctions cérébrales. En effet, malgré les développements récents de la neuroimagerie fonctionnelle, l'exploration du cortex en IRM fonctionnelle (IRMf) ou des faisceaux de substance blanche en tractographie IRM n'est pas suffisamment précise pour être directement applicable chez un individu donné, notamment en neurochirurgie. L'IRMf manque de reproductibilité chez les volontaires sains (15) et n'est qu'imparfaitement corrélée aux constatations faites par stimulation corticale directe chez les patients porteurs de lésions cérébrales (29). L'exploration des faisceaux de fibres blanches en IRM de tractographie souffre de nombreuses limitations liées au principe même de la méthode qui n'est qu'une représentation très indirecte de l'anatomie morphologique de la substance blanche basée sur les propriétés de diffusion des molécules d'eau dans les tissus biologiques (22). La tractographie d'un même faisceau chez un même individu est donc très variable selon la méthode d'acquisition IRM et l'algorithme mathématique de reconstruction utilisés (20). Par ailleurs, la modification des propriétés de diffusion des molécules d'eau en présence d'une lésion cérébrale n'est pas encore parfaitement comprise et ses effets sur la tractographie ne sont pas négligeables. Cette technique demande donc encore à être validée avant d'être utilisée en routine clinique. Enfin, elle ne permet généralement pas d'explorer l'anatomie fonctionnelle, même si des modifications de la substance blanche ont pu être mises en évidence en imagerie de diffusion lors de la réalisation de tâches cognitives, faisant suspecter le rôle des fibres blanches dans la plasticité cérébrale à court terme (16, 32).

La SED est donc aujourd'hui l'outil de référence pour la pratique de la neurochirurgie oncologique fonctionnelle, notamment en condition éveillée (31). Son utilisation per-opératoire est devenue incontournable, spécialement pour la chirurgie des gliomes de bas grade. Elle a conduit à améliorer grandement le pronostic oncologique en autorisant l'exérèse de lésions en régions réputées autrefois inopérables, tout en améliorant la qualité de vie des malades en réduisant significativement les risques de déficit neurologique post-opératoire permanent (2, 9). Ainsi, dans une méta-analyse récente portant sur plus de 8000 patients porteurs d'un gliome diffus de bas grade, il a été montré que la cartographie fonctionnelle per-opératoire a permis d'obtenir un taux de déficit neurologique post-opératoire permanent de 3,4% contre 8,2% sans cartographie, ainsi qu'un taux d'exérèse complète à l'IRM de 75% contre 58% sans cartographie (2).

L'objectif de ce chapitre est de décrire les principes d'utilisation de la stimulation électrique directe per-opératoire, en insistant sur les règles techniques, notamment en chirurgie éveillée des gliomes, pour limiter les écueils inhérents à cet outil.

## II. Historique (description principes et évolutions ultérieures)

La technique de SED corticale a été développée par Penfield en 1937 pour préserver les régions cérébrales fonctionnelles éloquentes lors de la chirurgie de l'épilepsie (27). La procédure a ensuite été reprise et améliorée dans ses détails techniques par Ojemann au cours des années 1970 (35).

MS Berger fut le premier à utiliser la SED en neurochirurgie oncologique durant les années 90 (1) puis H Duffau au début des années 2000 a proposé d'étendre l'utilisation de la SED à l'exploration de la substance blanche sous-corticale pour préserver les faisceaux de connexion (8). Depuis, cette technique s'est largement diffusée et a permis de modifier radicalement la prise en charge thérapeutique et le pronostic des gliomes de bas grade (2).

++++

## III. Indications

### III.1. Gliomes de bas grade

La SED est tout particulièrement indiquée lorsque le pronostic d'une lésion cérébrale infiltrant une zone fonctionnelle du cerveau peut être amélioré par une exérèse chirurgicale complète ou subtotale. C'est le cas des gliomes de bas grade, pathologie tumorale pré-cancéreuse infiltrante d'évolution lente pour laquelle il a été démontré qu'une réduction du volume permettait d'obtenir un contrôle tumoral prolongé, et ainsi de retarder de plusieurs années l'évolution naturelle vers l'anaplasie (18), tout en maintenant une qualité de vie optimale pour les malades (9-12).

Le choix des fonctions cognitives à explorer et conserver dépend des connaissances anatomiques fonctionnelles a priori de la région cérébrale impliquée, et des anomalies retrouvées lors de l'exploration neuropsychologique préopératoire (21). Ce choix est idéalement adapté à l'échelon individuel non seulement aux épreuves neuro-psychologiques préopératoires mais également selon le mode de vie du malade et ses besoins socio-professionnels. Ainsi, on pourra définir en préopératoire les limites fonctionnelles de la résection chirurgicale, et non plus se baser uniquement sur les limites morphologiques de la lésion visible en IRM FLAIR. Ceci est d'autant plus important qu'il a été démontré que ces limites d'imagerie étaient virtuelles puisqu'il est retrouvé des cellules tumorales à distance de l'infiltration FLAIR (14, 23, 26). L'enjeu dans cette pathologie n'est donc pas tant de chercher à obtenir une résection tumorale "complète" à l'imagerie, que de proposer au malade une vie sociale et professionnelle normale la plus longue possible en modifiant l'histoire naturelle du gliome grâce à la chirurgie (10) (pour plus d'informations, voir le chapitre Gliomes de bas grades de l'encyclopédie).

++++

### III.2. Autres pathologies

La SED peut également être proposée pour définir les limites fonctionnelles de l'exérèse de lésions épileptiques ou de gliomes de haut grade. Dans la chirurgie de l'épilepsie, la lésion n'étant habituellement pas évolutive, l'enjeu est donc d'obtenir la guérison ou l'amélioration du symptôme épileptique sans sacrifier la fonction cognitive. Dans la chirurgie des gliomes de haut grade, lorsque la lésion est proche d'une zone "éloquente" mais que l'exérèse complète ou sub-totale de la prise de contraste semble tout de même réalisable, alors la chirurgie éveillée avec SED peut avoir un intérêt pour que le geste chirurgical ne soit pas à l'origine d'un déficit neurologique permanent chez ces patients pour qui le mauvais pronostic de la maladie rend la qualité de vie primordiale.

Enfin, il est également possible de percevoir la SED comme une aide au choix de la voie d'abord, notamment dans la

chirurgie de lésions plus profondes telles que les métastases ou les cavernomes. Dans ces cas, la SED ne permettra pas tant de définir les limites de l'exérèse - puisque généralement, pour ce type de lésions non infiltrantes, les limites sont anatomiques - que de définir la zone de corticotomie qui pourra alors ne pas correspondre à la trajectoire la plus courte entre la surface du cerveau et la cible.

++++

## IV. Critères requis pour poser l'indication

Pour la chirurgie des gliomes de bas grade, l'aspect IRM étant très évocateur, l'indication à la chirurgie d'emblée tend à se systématiser même si la lésion ne se situe pas à proprement parler en zone "éloquente", car cette technique permet alors de réaliser une exérèse "supra-totale" (36), c'est-à-dire en prenant une marge d'exérèse très large, au-delà de la lésion visible en IRM FLAIR, permettant ainsi une rémission complète longue (définie comme l'absence de pathologie décelable), sans qu'il soit encore aujourd'hui possible, faute d'un recul suffisant, de parler de guérison. Pour cette pathologie, hors situation d'urgence telle qu'une hypertension intracrânienne qui pourra conduire à proposer une chirurgie "classique" sous anesthésie générale pour réduire le volume tumoral, la chirurgie éveillée avec SED tend à devenir le "gold standard", et ce sur simple évocation du diagnostic à l'IRM.

Pour les gliomes de haut grade en zone éloquente, l'IRM permet généralement de différencier une infiltration d'un refoulement. En cas de refoulement à l'IRM de la région a priori éloquente, d'autant plus si la corticothérapie a permis la récupération d'un déficit neurologique, l'intérêt d'une chirurgie éveillée avec SED peut être discuté.

Pour les métastases cérébrales, la problématique est proche. Comme il existe une ? alternative thérapeutique, les risques de la chirurgie devront toutefois être mis en balance avec les chances de contrôle tumoral et les risques d'une irradiation stéréotaxique.

Pour la chirurgie de l'épilepsie et la chirurgie des cavernomes, ce sont la localisation de la lésion, les explorations électrophysiologiques et les symptômes neurologiques qui feront discuter la procédure.

++++

## V. Acte chirurgical

### V. 1. Matériel, équipement, dispositifs médicaux

Il existe différents modèles de générateur, qui permettent tous de régler les paramètres essentiels à la réalisation de la SED. Ces paramètres, définis au regard des connaissances neuro-physiologiques de l'effet d'un courant électrique sur le potentiel membranaire neuronal, sont les suivants (4, 35) :

- Impulsions rectangulaires de 1 ms, courant biphasique,
- Fréquences de 50 à 60 Hz,
- Intensités de 1 à 6 mA (anesthésie locale), et de 4 à 18 mA (anesthésie générale)
- Augmentation progressive des intensités de 0,5 en 0,5 mA sur l'écran du générateur,
- Durée de stimulation : 1 seconde (sensori-moteur), 4 secondes (fonctions cognitives)

Les limites anatomiques de la lésion peuvent être repérée en per-opératoire avant la réalisation de la cartographie par un système de neuronavigation et/ou par échographie.

++++

## V. 2. Préparation du malade

La préparation psychologique du malade est très importante pour obtenir son adhésion à ce type de procédure au cours de laquelle il aura un rôle actif central. Il faudra donc veiller à avoir parfaitement informé le malade sur la pathologie, son histoire naturelle, sur l'intérêt de la chirurgie, l'intérêt et le déroulement de la procédure éveillée, les limites fonctionnelles prévisibles compte tenu de la localisation cérébrale de la lésion. Ces limites fonctionnelles pourront être adaptées selon le patient, son mode de vie, ses activités socio-professionnelles.

Par ailleurs, le malade doit systématiquement bénéficier d'un bilan orthophonique et neuropsychologique pré-opératoire extensif, afin d'adapter les tests per-opératoires aux résultats du bilan pré-opératoire. Il est alors informé par l'orthophoniste et par le neuropsychologue des tests qui seront réalisés pendant la phase éveillée.

Enfin, la procédure d'anesthésie étant elle aussi spécifique, l'information anesthésique est également importante. Selon les habitudes locales, les deux protocoles d'anesthésie les plus fréquemment adoptés sont soit une séquence endormi/éveillé/endormi, soit une anesthésie locale "pure". Lors de la première option, le premier temps sous anesthésie générale nécessite la pose d'un masque laryngé, le second temps endormi pouvant être réalisé avec masque laryngé ou intubation oro-trachéale (3).

++++

## V. 3. Installation du malade

[<a href="IMG/jpg/figure\\_1.jpg" type="image/jpeg" title="">](IMG/jpg/figure_1.jpg)



Le décubitus latéral controlatéral à la lésion est la règle, car par cette position, il est aisé d'exposer largement les régions éloquentes (somato-sensori-motrices, langagières...) tout en permettant au malade d'effectuer les tests qui nécessiteront la visualisation des épreuves cognitives sur un écran d'ordinateur portable. Un soin particulier doit être porté à l'installation du malade, qui doit être suffisamment confortable pour éviter que la qualité des tests cognitifs per-opératoire ne soit perturbée par un inconfort ou une douleur liée à la position (bien faire attention aux points d'appui, notamment aux membres, à la torsion cervicale qui devra être minimale, couvrir le malade pour éviter le refroidissement).

La tête est prise dans la tétière à pointes. Une anesthésie locale est réalisée en regard des pointes puis, une fois la tétière en place, un bloc de scalp à la xylocaïne ou à la naropéine en insistant sur le muscle temporal.

Enfin, lors de la mise en place du champ opératoire, il est important de veiller à conserver, pour le malade, le champ visuel le plus large possible, pour lui permettre de bien visualiser l'écran qui sera utilisé par l'orthophoniste et/ou le neuropsychologue lors des tests.

++++

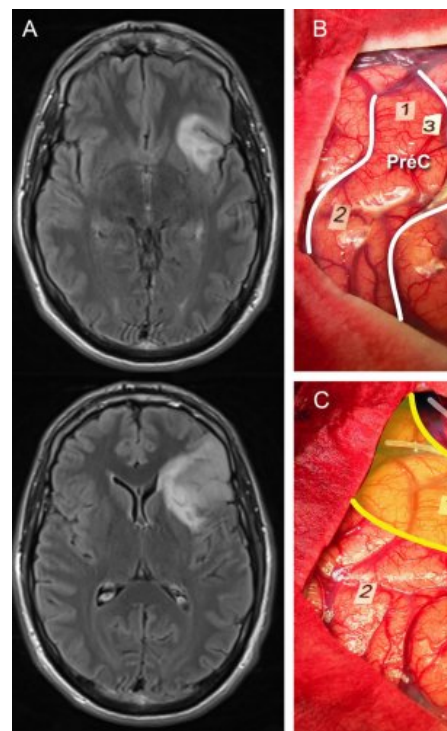
## V. 4. Description de l'acte en précisant les variantes les pièges et les problèmes éventuels

### V.4.1. Spécificités de l'abord chirurgical

Une fois le scalp et le muscle temporal réclinés, il est recommandé d'infiltrer de nouveau le muscle temporal à la xylocaïne sur son versant interne. Le volet osseux doit être suffisamment large pour exposer les zones éloquentes et obtenir une cartographie "positive" (Figure 2). En effet, une cartographie "négative" ne protège en aucun cas, et au contraire peut être source d'erreurs par mauvaise compréhension de l'anatomie corticale mais surtout de la connectivité sous-corticale.

A ce stade, une fois le volet soulevé, l'anesthésie générale, si on y avait eu recours, peut alors être suspendue. Pendant ces quelques minutes durant lesquelles le malade revient progressivement à la conscience, la dure-mère est ouverte. Il est possible également d'infiltrer la dure-mère à la xylocaïne. Les limites de la lésion sont alors délimitées à l'aide de la neuronavigation ou de l'échographie.

[<](IMG/jpg/figure_2-.jpg)



++++

### V.4.2. Cartographie corticale (Vidéo)

[<](spip_documents_center_media_video?id=media_63_25415)

<video id="video\_63\_25415" controls preload="none" width="320" height="240" poster="https://www.neurochirurgica.org/IMG/png/capture\_d\_ecran\_2014-12-04\_a\_17.41.42.png">

Une fois le malade parfaitement éveillé et confortable, la cartographie cérébrale peut commencer.

Le premier objectif est de définir l'intensité minimale qui permettra d'obtenir une réponse "négative", c'est-à-dire une suspension temporaire de la fonction du cortex situé entre les deux extrémités de l'électrode bipolaire. Il faut alors préférentiellement stimuler le cortex prémoteur ou sensorimoteur primaire dont la somatotopie est connue et constante d'un individu à l'autre. L'opérateur applique alors pendant 2 à 3 secondes l'électrode de stimulation bipolaire, réglée à 1 ou 1,5 mA, sur le cortex cible. En cas de cartographie "négative", c'est-à-dire en l'absence de réponse à la stimulation, il faut alors progressivement augmenter l'intensité de stimulation, par pas de 0,5 mA, jusqu'à obtenir une réponse. Classiquement, le seuil d'intensité de stimulation se situe entre 1,5 et 2,5 mA. Ce seuil dépendant de plusieurs paramètres très variables d'un patient à l'autre (infiltration tumorale, effet de masse, type d'anesthésie...). Il devra être défini précisément à chaque procédure. Une fois le seuil d'intensité déterminé, il pourra être conservé jusqu'à la fin de l'intervention.

La cartographie corticale fonctionnelle peut alors être réalisée. Le malade effectue les tests déterminés au préalable selon la fonction à explorer (dénomination, compréhension, lecture, écriture, calcul, reconnaissance visuelle, discours spontané, motricité...). L'orthophoniste doit alors observer attentivement le malade pour déceler toute erreur lors de la tâche cognitive ou toute anomalie de la motricité que le chirurgien ne peut déceler au travers des champs. Les stimulations lors de la cartographie doivent respecter certaines règles pour limiter le risque de faux négatifs, faux positifs et le risque de crise convulsive (cf. infra) (4) :

- stimuler l'ensemble de la surface corticale exposée tous les 5 mm<sup>2</sup> (sonde de 5 mm d'espacement),
- stimuler chaque site au moins 3 fois,
- ne jamais stimuler le même site cortical deux fois successivement,
- toujours réaliser un test de vérification sans stimulation entre deux stimulations,
- si tâche cognitive, toujours commencer la stimulation avant la présentation de l'item,
- en sous-cortical, il est possible de majorer l'intensité de 2 mA,
- toujours garder les surfaces à stimuler à peine humides,
- en cas de crise, irriguer avec du sérum froid et ne pas restimuler immédiatement après.

Des indices papier numérotés sont progressivement disposés sur les sites ayant provoqué un déficit reproductible (Figure 2), puis, une fois la cartographie corticale complète et bien comprise, l'exérèse peut débuter.

++++

### V.4.3. Stimulation cérébrale durant l'exérèse

À partir des connaissances anatomiques vasculaires et de la connectivité sous-corticale, le déroulement de l'exérèse chirurgicale est adapté à la cartographie corticale réalisée en début d'intervention. La technique chirurgicale sera discutée plus en détail dans le chapitre "Technique chirurgicale : tumeur gliale".

Durant l'exérèse, le malade continue les tests cognitifs qui doivent être adaptés à la demande du chirurgien, en fonction de la région dans laquelle il travaille. La réalisation d'une double tâche motrice et langagière (réalisation d'une flexion/extension du coude tout en ouvrant et fermant le poing et dans le même temps d'une tâche langagière) est alors recommandée car elle n'est pas "complexe" mais demande le maintien d'une attention soutenue, ce qui permet de tester la capacité de concentration du malade et son état de fatigue durant le geste d'exérèse.

Lors de la dissection profonde au sein de la substance blanche, il est possible de stimuler à nouveau :

- soit lorsqu'anatomiquement le chirurgien pense arriver au contact d'un faisceau indispensable à la fonction à préserver,
- soit lorsque la dissection avec le dissecteur à ultrasons provoque un déficit transitoire. La stimulation peut alors s'effectuer à la même intensité que lors de la stimulation corticale. Pour augmenter la sensibilité de la stimulation, il est possible d'augmenter l'intensité de 2 mA, ce qui augmentera la diffusion du courant électrique autour de l'électrode sans provoquer de crise convulsive. Dans ce cas, il faudra bien évidemment faire très attention à ne pas entrer au contact du cortex car le risque de provoquer une crise convulsive est alors majeur. La poursuite des tests par le malade étant éprouvante physiquement, le geste ne pourra classiquement pas

dépasser 1h30 à 2h00. C'est une donnée importante à intégrer dans le planning de l'acte chirurgical. ++++

**V.4.4. Ecueils de la technique (24) : Crises convulsives :** La stimulation électrique directe entraîne une désorganisation de l'activité électrique des neurones situés entre les 2 extrémités de l'électrode bipolaire. Ce mécanisme physique est à l'origine de la réponse attendue, à savoir un déficit neurologique transitoire. Toutefois, une trop longue durée d'application de l'électrode, une trop forte intensité (ampérage) ou une répétition trop rapprochée des stimulation sur une même région peuvent déclencher une crise convulsive. Il faudra donc veiller à ne jamais dépasser 4 secondes de stimulation électrique, ne pas monter trop rapidement l'intensité de stimulation lors de la recherche du seuil, et ne pas réaliser deux stimulations successives trop rapprochées dans le temps sur la même zone corticale, pour éviter de stimuler durant la phase d'hyperexcitabilité qui fait suite à la période réfractaire (19). Malgré toutes ces précautions, il est possible, notamment si l'épilepsie du malade opéré est ancienne et mal contrôlée, que la stimulation électrique génère une crise convulsive clinique (partielle, partielle complexe, voire généralisée). Une hyperhémie du cortex concerné par la crise épileptique est habituellement observée. Le contrôle de la crise est alors facilement obtenu par irrigation du cortex de Ringer Lactate glacé (conservé dans une cupule remplie de glace en salle d'opération) (30). ++++

**Faux positifs :** On définit comme faux positif une région pour laquelle la stimulation électrique a provoqué un déficit neurologique alors que l'exérèse de cette région n'aurait pas provoqué de déficit permanent pour le malade. " La cause la plus fréquente de faux positif est la fatigue du malade, raison pour laquelle il est important d'aller "rapidement" en zone éloquente tant en région corticale que sous corticale pour définir rapidement les limites de l'exérèse chirurgicale. Cette fatigue est accrue par l'occurrence itérative de crises convulsives per-opératoires, conduisant à un état post-critique prolongé. Il est donc important, outre le contrôle de l'intensité électrique de stimulation que le patient arrive en salle d'opération avec le minimum de stress et de fatigue, et en ayant pris son traitement anti-épileptique habituel le matin de la chirurgie. " Une autre cause de faux positif est le déclenchement d'une post-décharge électrique à distance de la région stimulée. Il a été montré qu'une stimulation corticale pouvait induire une réponse corticale distante (ou potentiel évoqué cortico-cortical) (17). Si le cortex distant désorganisé par la post-décharge, connecté anatomiquement à la région stimulée par un faisceau de fibres blanches permettant la propagation directe de l'influx électrique, sous-tend la fonction, alors on peut décider de préserver la zone stimulée alors que son exérèse n'aurait pas provoqué de déficit. L'enregistrement permanent de l'électrocorticographie lors de la cartographie corticale pourrait être une solution mais demande à être perfectionnée (34). " De plus, le déclenchement d'une crise partielle simple peut être à l'origine d'un faux positif mais l'application des règles énoncées ci-dessus permet de réduire considérablement ce risque. " Enfin, la plasticité cérébrale peut permettre une récupération plusieurs semaines après l'exérèse chirurgicale. C'est le cas notamment dans les suites de l'exérèse de l'aire motrice supplémentaire. La plasticité cérébrale permet dans ce cas, par réorganisation du réseau prémoteur, une récupération fonctionnelle en recrutant le cortex homologue controlatéral. Bien que ce type de réorganisation corticale a été démontré après l'exérèse de différentes régions cérébrales (5, 28), il est encore aujourd'hui impossible de prédire avec fiabilité ce type de plasticité à l'échelon individuel. ++++

**Faux négatifs :** On définit comme faux négatif une région pour laquelle l'exérèse chirurgicale a provoqué un déficit neurologique permanent pour le malade alors que la stimulation électrique de cette région n'avait pas provoqué de déficit per-opératoire. " Une première cause possible est une intensité de stimulation inférieure au seuil du malade. Pour éviter cet écueil, il faudra veiller à ce que l'intensité de stimulation soit suffisante (cf. supra), à ce que la période de stimulation ne soit pas trop courte (2 à 4 secondes pour les épreuves cognitives), et à ce qu'il n'y ait pas trop de liquide cérébro-spinal sur le site de stimulation (la résistance du LCS étant 4 et 8 fois supérieure à celles, respectivement, de la substance grise et de la substance blanche (13, 25). " Une autre cause possible de faux négatif est la stimulation durant la période réfractaire d'une post-décharge. Ne pas dépasser le seuil minimal d'intensité de stimulation permet de limiter le risque de survenue d'une post-décharge, et stimuler plusieurs fois la même région pour la même tâche cognitive lors de la cartographie permet de diminuer la probabilité de stimuler en période réfractaire. " Il a été démontré qu'une mauvaise synchronisation entre la stimulation et la mise en route du processus cognitif testé peut conduire à un faux négatif (1). En effet, si la stimulation est effectuée après la présentation de l'épreuve, si le malade a pu traiter l'information avant la stimulation. Il y aura alors un faux négatif. Il est donc recommandé, pour obtenir une bonne synchronisation, que le chirurgien stimule à partir du signal sonore annonçant une nouvelle figure, paramètre qui peut être défini lors de la réalisation de la présentation Powerpoint par l'orthophoniste (par exemple lors de la réalisation de



l'épreuve de dénomination DO 80). Généralement, le signal sonore est réglé 0,5 seconde avant l'apparition de la figure. " Enfin, un faux négatif peut être le résultat d'une tâche orthophonique ou neuro-psychologique inadaptée à la région corticale stimulée (6, 33), d'où l'importance d'un bilan préopératoire extensif et d'une adaptation individuelle, pour chaque malade, de la batterie de tests per-opératoires à ce bilan. ++++

## VI. Suites opératoires

Lorsque l'exérèse est poursuivie jusqu'au contact de la zone élocutrice, une aggravation post-opératoire transitoire est systématiquement observée lorsqu'une évaluation neuro-psychologique post-opératoire extensive est réalisée (33) quelques jours après la chirurgie. Cette aggravation, qui est probablement expliquée par des phénomènes inflammatoires secondaires au geste chirurgical, peut être considérée comme le témoin que les limites fonctionnelles de l'exérèse ont été atteintes. Il est donc important d'en informer le malade avant la chirurgie afin de le rassurer sur le caractère transitoire du déficit post-opératoire attendu. Une courte corticothérapie de quelques jours pourra être prescrite pour limiter les symptômes.

La récupération de ce déficit transitoire nécessite une rééducation orthophonique intensive pendant les semaines qui suivent l'acte chirurgical. Pour que cette rééducation soit efficace, il est important qu'elle soit programmée au préalable, au plus proche du domicile du patient. Les aspects cognitifs sur lesquels portera cette rééducation ne pourront être définis qu'en post-opératoire, après le bilan extensif qui sera réalisé lors de l'hospitalisation, avant la sortie du patient au domicile.

++++

## VII. Conclusion et perspectives

Aujourd'hui, l'utilisation de la SED selon des règles techniques strictes permet d'obtenir une sensibilité proche de 100%, c'est-à-dire qu'il est possible de n'avoir aucun faux négatif et donc d'opérer avec une très grande sécurité fonctionnelle. Par contre, la spécificité de la SED n'est pas parfaite. Comme le font remarquer Mandonnet et al. (24), "la SED peut en effet indiquer qu'une structure est cruciale en raison de l'induction d'une réponse fonctionnelle transitoire lors de la stimulation, alors que (1) cet effet est généré par la propagation de l'électro-stimulation, de façon antidromique le long des axones vers un réseau réellement essentiel et/ou (2) la région stimulée peut être fonctionnellement compensée par des mécanismes de plasticité cérébrale". La SED peut donc nous amener à ne pas réséquer une partie de la lésion alors que son exérèse n'aurait pas provoqué de déficit permanent.

Toutefois, cette limitation nous semble acceptable étant donné les résultats de cette technique tant sur l'extension des exérèses chirurgicales que sur la diminution du risque de séquelles neurologiques post-opératoires (2). Par ailleurs, ce mécanisme de plasticité cérébrale ne contre-indique en aucun cas une ré-intervention. Au contraire, il a été montré que cette plasticité permettait de proposer une seconde chirurgie plusieurs années après une première exérèse qui avait été interrompue pour respecter les limites fonctionnelles de la cartographie corticale, la réorganisation corticale autorisant alors une extension de l'exérèse (7).

Afin d'améliorer la spécificité de la SED et ainsi permettre d'améliorer la qualité des résections chirurgicales sans entraver la préservation des fonctions cognitives, les futures avancées dans 3 domaines de recherche en neurosciences seront probablement déterminantes :

- La meilleure compréhension des mécanismes de plasticité cérébrale (7) pourrait permettre de prédire les chances de récupération à long terme d'une région essentielle le jour de la chirurgie.
- La parfaite connaissance de la connectivité sous-corticale, et notamment la fonction des sous-parties des grands faisceaux d'association, pourrait nous aider à détecter les faux positifs liés à la propagation de l'influx électrique vers une région corticale distante.
- Enfin, la meilleure connaissance des mécanismes physiques secondaires à la stimulation électrique corticale et

axonale permettra de mieux comprendre ses effets à l'échelon cellulaire et à plus grande échelle sur la connectivité cérébrale. ++++

## References

1. Berger MS, Ojemann GA : Intraoperative brain mapping techniques in neuro-oncology. *Stereotact Funct Neurosurg* 58:153-161, 1992.
2. De Witt Hamer PC, Robles SG, Zwinderman AH, Duffau H, Berger MS : Impact of intraoperative stimulation brain mapping on glioma surgery outcome : a meta-analysis. *J Clin Oncol* 30:2559-2565, 2012.
3. Deras P, Moulinie G, Maldonado IL, Moritz-Gasser S, Duffau H, Bertram L : Intermittent general anesthesia with controlled ventilation for asleep-awake-asleep brain surgery : a prospective series of 140 gliomas in eloquent areas. *Neurosurgery* 71:764-771, 2012.
4. Duffau H : [Peroperative functional mapping using direct electrical stimulations. Methodological considerations]. *Neurochirurgie* 50:474-483, 2004.
5. Duffau H : Lessons from brain mapping in surgery for low-grade glioma : insights into associations between tumour and brain plasticity. *Lancet Neurol* 4:476-486, 2005.
6. Duffau H : New concepts in surgery of WHO grade II gliomas : functional brain mapping, connectionism and plasticity—a review. *J Neurooncol* 79:77-115, 2006.
7. Duffau H : The huge plastic potential of adult brain and the role of connectomics : New insights provided by serial mappings in glioma surgery. *Cortex*, 2013.
8. Duffau H, Capelle L, Sichez N, Denvil D, Lopes M, Sichez JP, Bitar A, Fohanno D : Intraoperative mapping of the subcortical language pathways using direct stimulations. An anatomo-functional study. *Brain* 125:199-214, 2002.
9. Duffau H, Lopes M, Arthuis F, Bitar A, Sichez JP, Van Effenterre R, Capelle L : Contribution of intraoperative electrical stimulations in surgery of low grade gliomas : a comparative study between two series without (1985-96) and with (1996-2003) functional mapping in the same institution. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 76:845-851, 2005.
10. Duffau H, Mandonnet E : The "onco-functional balance" in surgery for diffuse low-grade glioma : integrating the extent of resection with quality of life. *Acta Neurochir (Wien)* 155:951-957, 2013.
11. Duffau H, Moritz-Gasser S, Gatignol P : Functional outcome after language mapping for insular World Health Organization Grade II gliomas in the dominant hemisphere : experience with 24 patients. *Neurosurg Focus* 27:E7, 2009.
12. Duffau H, Peggy Gatignol ST, Mandonnet E, Capelle L, Taillandier L : Intraoperative subcortical stimulation mapping of language pathways in a consecutive series of 115 patients with Grade II glioma in the left dominant hemisphere. *J Neurosurg* 109:461-471, 2008.
13. Geddes LA, Baker LE : The specific resistance of biological material—a compendium of data for the biomedical engineer and physiologist. *Med Biol Eng* 5:271-293, 1967.
14. Gerin C, Pallud J, Deroulers C, Varlet P, Oppenheim C, Roux FX, Chretien F, Thomas SR, Grammaticos B, Badoual M : Quantitative characterization of the imaging limits of diffuse low-grade oligodendrogliomas. *Neuro Oncol* 15:1379-1388, 2013.
15. Havel P, Braun B, Rau S, Tonn JC, Fesl G, Bruckmann H, Ilmberger J : Reproducibility of activation in four motor paradigms. An fMRI study. *J Neurol* 253:471-476, 2006.
16. Hofstetter S, Tavor I, Tzur Moryosef S, Assaf Y : Short-term learning induces white matter plasticity in the fornix. *J Neurosci* 33:12844-12850, 2013.
17. Ishitobi M, Nakasato N, Suzuki K, Nagamatsu K, Shamoto H, Yoshimoto T : Remote discharges in the posterior language area during basal temporal stimulation. *Neuroreport* 11:2997-3000, 2000.
18. Jakola AS, Unsgard G, Myrmed KS, Kloster R, Torp SH, Lindal S, Solheim O : Low grade gliomas in eloquent locations - implications for surgical strategy, survival and long term quality of life. *PLoS One* 7:e51450, 2012.
19. Jayakar P : Physiological principles of electrical stimulation. *Adv Neurol* 63:17-27, 1993.
20. Jones DK, Kn sche TR, Turner R : White matter integrity, fiber count, and other fallacies : The do's and don'ts

of diffusion MRI. *Neuroimage* 73:239-254, 2013.

21. Klein M, Duffau H, De Witt Hamer PC : Cognition and resective surgery for diffuse infiltrative glioma : an overview. *J Neurooncol* 108:309-318, 2012.
22. Le Bihan D, Johansen-Berg H : Diffusion MRI at 25 : Exploring brain tissue structure and function. *Neuroimage* 61:324-341, 2012.
23. Lunsford LD, Martinez AJ, Latchaw RE : Magnetic resonance imaging does not define tumor boundaries. *Acta Radiol Suppl* 369:154-156, 1986.
24. Mandonnet E, Winkler PA, Duffau H : Direct electrical stimulation as an input gate into brain functional networks : principles, advantages and limitations. *Acta Neurochir (Wien)* 152:185-193, 2010.
25. Nathan SS, Lesser RP, Gordon B, Thakor NV : Electrical stimulation of the human cerebral cortex. Theoretical approach. *Adv Neurol* 63:61-85, 1993.
26. Pallud J, Varlet P, Devaux B, Geha S, Badoual M, Deroulers C, Page P, Dezamis E, Daumas-Duport C, Roux FX : Diffuse low-grade oligodendrogliomas extend beyond MRI-defined abnormalities. *Neurology* 74:1724-1731, 2010.
27. Penfield W, Boldrey E : SOMATIC MOTOR AND SENSORY REPRESENTATION IN THE CEREBRAL CORTEX OF MAN AS STUDIED BY ELECTRICAL STIMULATION. *Brain* 60:389-443, 1937.
28. Robles SG, Gatignol P, Lehericy S, Duffau H : Long-term brain plasticity allowing a multistage surgical approach to World Health Organization Grade II gliomas in eloquent areas. *J Neurosurg* 109:615-624, 2008.
29. Roux FE, Boulanouar K, Lotterie JA, Mejdoubi M, LeSage JP, Berry I : Language functional magnetic resonance imaging in preoperative assessment of language areas : correlation with direct cortical stimulation. *Neurosurgery* 52:1335-1345 ; discussion 1345-1337, 2003.
30. Sartorius CJ, Berger MS : Rapid termination of intraoperative stimulation-evoked seizures with application of cold Ringer's lactate to the cortex. Technical note. *J Neurosurg* 88:349-351, 1998.
31. Szelenyi A, Bello L, Duffau H, Fava E, Feigl GC, Galanda M, Neuloh G, Signorelli F, Sala F : Intraoperative electrical stimulation in awake craniotomy : methodological aspects of current practice. *Neurosurg Focus* 28:E7, 2010.
32. Tavor I, Hofstetter S, Assaf Y : Micro-structural assessment of short term plasticity dynamics. *Neuroimage* 81:1-7, 2013.
33. Teixidor P, Gatignol P, Leroy M, Masuet-Aumatell C, Capelle L, Duffau H : Assessment of verbal working memory before and after surgery for low-grade glioma. *J Neurooncol* 81:305-313, 2007.
34. Trebuchon A, Guye M, Tcherniack V, Tramon E, Bruder N, Metellus P : [Interest of EEG recording during direct electrical stimulation for brain mapping function in surgery]. *Ann Fr Anesth Reanim* 31:e87-90, 2012.
35. Whitaker HA, Ojemann GA : Graded localisation of naming from electrical stimulation mapping of left cerebral cortex. *Nature* 270:50-51, 1977.
36. Yordanova YN, Moritz-Gasser S, Duffau H : Awake surgery for WHO Grade II gliomas within "noneloquent" areas in the left dominant hemisphere : toward a "supratotal" resection. Clinical article. *J Neurosurg* 115:232-239, 2011.