

Implant auditif du tronc cérébral chez l'adulte

Auditory brainstem implant in adults

D Bouccara*, A Bozorg Grayeli*, **, M Kalamarides***, O Sterkers*, **

* AP-HP, Hôpital Beaujon, Service d'ORL, Clichy 92110.

** UMR-S 867 Inserm, Paris 7 Denis-Diderot «Chirurgie otologique mini-invasive robotisée», Paris 75018.

*** AP-HP, Hôpital Beaujon, Service de Neurochirurgie, Clichy 92110.

Mots clés

- ◆ Réhabilitation auditive
- ◆ Implant auditif
- ◆ Neurofibromatose de type 2
- ◆ Surdité

Résumé

L'implant auditif du tronc cérébral est une modalité de réhabilitation de l'audition, réservée à des indications rares pour lesquelles il n'y a pas de bénéfice avec les aides auditives et une impossibilité ou un risque à réaliser une implantation cochléaire. Son indication principale est la Neurofibromatose de type 2 (NF2), affection caractérisée par la présence d'un schwannome vestibulaire bilatéral. L'évaluation, réalisée par des équipes oto-neurochirurgicales ayant à la fois l'expérience de la chirurgie de l'angle pontocérébelleux et celle de l'implantation cochléaire, comporte un bilan clinique, radiologique (cérébral et médullaire), de la communication et psychologique.

Les résultats montrent que chez les patients NF2 le meilleur bénéfice fonctionnel auditif est obtenu dans les cas de schwannome vestibulaire de taille moyenne, avec une privation auditive du côté implantée brève ou nulle. Les facteurs de mauvais pronostic sont une privation auditive prolongée, un diamètre cisternal supérieur à 3 cm, une difficulté à la mise en place du porte-électrodes en peropératoire et l'activation de moins de 10 électrodes avec des sensations auditives. Dans les cas de surdité totale postmningitique avec ossification cochléaire totale le résultat obtenu est tout à fait comparable à celui des implants cochléaires dans cette indication (surdité postmningitique sans ou avec ossification partielle). Il en est de même pour les autres indications non tumorales (hors NF2).

Keywords

- ◆ Auditory rehabilitation
- ◆ Auditory device
- ◆ Neurofibromatose type 2
- ◆ Deafness

Abstract

Auditory Brainstem Implant (ABI) is used to restore hearing during situations without ability to perform cochlear implant (CI), due to tumors in neurofibromatosis type 2 (NF2) or major cochlea modifications, as postmeningitis ossified cochlea.

The pre-operative evaluation includes clinical, radiological, lipreading, and psychological status. A translabyrinthine or retrosigmoid approach is performed.

In NF2 patients, best results are obtained in cases of smaller vestibular schwannoma and none, or short term, auditory deprivation. Negative prognostic factors are duration of total hearing loss (> 10 years), tumor size (> 3 cm), difficulties in electrode array placement, complications during postoperative course and number of active electrodes (< 10). In cases of postmeningitis total deafness with totally ossified cochlea, results with ABI demonstrated a good benefit reaching these obtained with CI in post-meningitis deafness.

L'implant auditif du tronc cérébral est une modalité de réhabilitation de l'audition réservée à des indications rares pour lesquelles il n'y a pas de bénéfice avec les aides auditives et une impossibilité ou un risque à réaliser une implantation cochléaire. Le développement de cette technique a débuté dans les années 1980 à Los Angeles par House et Hitselberger (1, 2). Elle requiert une intervention nécessitant une équipe otoneurochirurgicale ayant à la fois l'expérience de la chirurgie de l'angle pontocérébelleux et celle de l'implantation cochléaire.

Le principe des implants auditifs du tronc cérébral est identique à celui des implants cochléaires, comportant un récepteur sous-cutané et un processeur externe. Les informations auditives captées par un microphone au niveau du processeur externe sont traitées par un microprocesseur qui génère des

stimulations électriques. Celles-ci sont transmises par voie trans-cutanée au récepteur sous-cutané qui est relié à un câble. Ce câble se termine par une palette sur laquelle sont placées les électrodes. Cette palette est placée chirurgicalement en regard des noyaux cochléaires du tronc cérébral (fig. 1).

Cette modalité de réhabilitation de l'audition est proposée essentiellement aux patients souffrant de Neurofibromatose de type 2 (NF2), chez lesquels la présence de schwannomes vestibulaires bilatéraux et l'éventuelle nécessité de leur excision conduit à une surdité profonde bilatérale. L'absence de conservation du nerf cochléaire rend en effet impossible une implantation cochléaire. Les indications se sont étendues, au-delà de la NF2, à certaines situations où l'implantation cochléaire est impossible, du fait de modifications anatomiques

Correspondance :

E mail : olivier.sterkers@bjn.aphp.fr

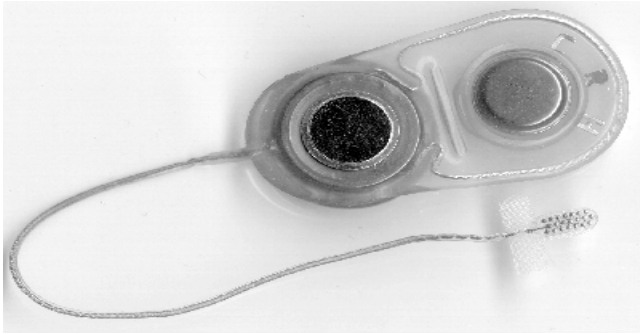


Figure 1 - Récepteur et porte-électrodes de l'implant auditif du tronc cérébral (document fourni avec courtoisie par la société Cochlear).

majeures et/ou de risques de complications (fuite de LCR), ou inefficace (ossification cochléaire bilatérale...).

Anatomie chirurgicale des noyaux cochléaires

Les données anatomiques concernant les noyaux cochléaires ont fait l'objet de différents travaux ayant permis de préciser la répartition des populations cellulaires et leurs rôles respectifs dans ce premier relais des voies auditives, ainsi que les variations possibles et leurs conséquences chirurgicales. Ces noyaux sont localisés au niveau de la surface dorso-latérale du tronc cérébral, au-dessus de la jonction pontomédullaire. Ils sont au nombre de deux : ventral et dorsal. Le noyau ventral a une forme pyramidale à sommet inférieur et est subdivisé en deux parties : antéro-ventral et postéro-ventral. Le noyau dorsal est de forme ovoïde. Il est situé en arrière et en bas du noyau ventral. Les fibres du nerf auditif se divisent en deux branches : l'une antérieure ou ascendante, l'autre postérieure ou descendante. Au niveau du tronc cérébral la distribution des fibres va respecter la tonotopie. Le site préférentiel de l'implantation du porte-électrodes sur le tronc cérébral est localisé au niveau des noyaux antéro-ventral et postéro-ventral, afin de stimuler un nombre important de cellules et de respecter un gradient fréquentiel. Sa localisation chirurgicale passe par l'identification du récessus du IVème ventricule (fig. 2). Les repères anatomiques de l'angle pontocérébelleux sont :

- à sa partie supérieure, le nerf trijumeau se dirigeant en avant, en haut et en dehors, vers le cavum de Meckel, accompagné de la veine pétreuse supérieure (veine de Dandy) ;
- à la partie moyenne, le paquet acousticofacial, sachant que lors de l'ablation du schwannome vestibulaire le nerf cochléo-vestibulaire n'est pas toujours conservé ;
- à la partie inférieure, les nerfs mixtes, plus ou moins masqués par le flocculus, avec de haut en bas : IX, X et XI ;
- l'artère cérébelleuse antéro-inférieure qui comporte parfois une boucle au niveau de la racine du nerf cochléo-vestibulaire.

Ces données anatomiques « normales » sont sujettes à des modifications importantes en cas de NF2 avec effet de masse des schwannomes sur le tronc cérébral.

Évaluation préopératoire

Cette évaluation s'inscrit dans le cadre du suivi des patients souffrant de NF2 par l'intermédiaire d'une prise en charge pluridisciplinaire telle que réalisée dans un centre de Référence (Maladies rares). Elle comporte, outre le bilan de toute surdité profonde, un bilan oto-neurologique précisant les atteintes liées à la NF2 ou séquellaires des thérapeutiques anté-

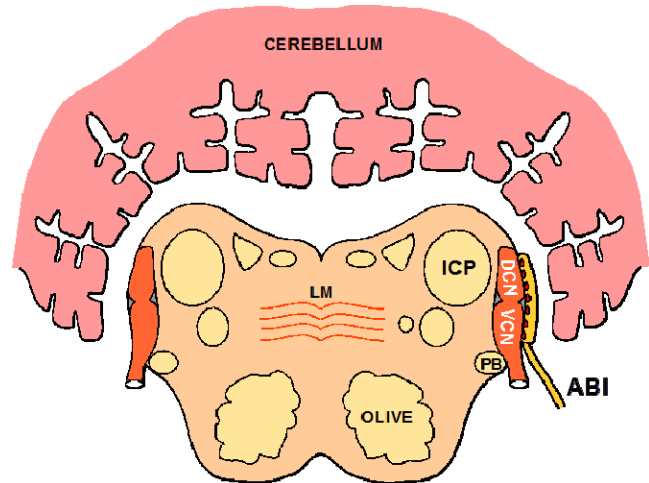


Figure 2 - Représentation schématique de l'emplacement du porte-électrodes en regard des noyaux auditifs du tronc cérébral (document fourni avec courtoisie par la société Cochlear).

rieures : vestibulaires, sur la motricité faciale et la déglutition. Un bilan radiologique avec IRM cérébrale et médullaire et scanner osseux des rochers a pour objectif de préciser la taille et la topographie des différentes lésions, les modifications du tronc cérébral rattachées au développement tumoral ou aux interventions antérieures éventuelles, et la forme du récessus du IVème ventricule.

Dans les indications autres que la NF2 l'évaluation a aussi pour but de confirmer l'absence de possibilité d'implantation cochléaire, du fait d'anomalies anatomiques confirmées à l'imagerie, et de réponse aux tests de stimulations électriques (test au promontoire ou stimulation de la fenêtre ronde).

Intervention chirurgicale

Le monitoring peropératoire des nerfs crâniens

Trois éléments font l'objet d'un suivi électrophysiologique au cours de l'intervention : le nerf facial, les nerfs mixtes (nerf glosso-pharyngien, nerf vague et nerf accessoire) et le nerf auditif.

La synchronisation du recueil des réponses avec les stimulations par l'implant permet, d'une part, de valider le positionnement du porte-électrodes en regard des noyaux auditifs par la présence d'une réponse caractéristique (3) et, d'autre part, de vérifier l'absence de stimulation d'autres structures nerveuses situées à proximité, essentiellement les noyaux des autres nerfs crâniens : VII, IX, X, et XI.

Le choix de la voie d'abord

Le choix de la voie d'abord dépend de la pathologie en cause, des modifications anatomiques identifiées sur l'imagerie préopératoire et des habitudes des opérateurs. La voie translabyrinthique est indiquée en cas d'exérèse de schwannome vestibulaire dans le même temps opératoire ou d'implantation secondaire chez un patient déjà opéré par cette voie. Elle permet un abord relativement direct du récessus du IVème ventricule dans un axe parallèle au nerf cochléaire. La voie rétrosigmoïde, utilisée systématiquement par certaines équipes et en l'absence de pathologie tumorale pour d'autres, nécessite une rétraction plus importante du flocculus et du cervelet pour visualiser le récessus.

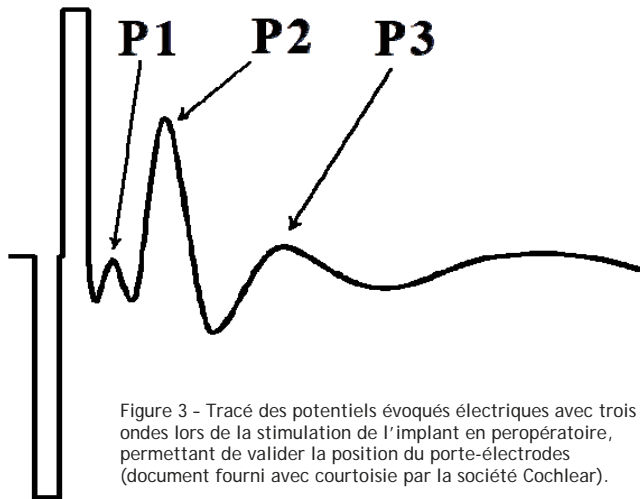


Figure 3 - Tracé des potentiels évoqués électriques avec trois ondes lors de la stimulation de l'implant en peropératoire, permettant de valider la position du porte-électrodes (document fourni avec courtoisie par la société Cochlear).

La mise en place de l'implant

Dans les cas de NF2, la mise en place du porte-électrodes a lieu une fois l'ablation tumorale terminée. En cas d'intervention ou d'irradiation antérieure, il peut exister une fibrose ou une arachnoïdite plus ou moins étendue.

Le récessus du IVème ventricule, ou foramen de Luschka, est localisé entre les racines du nerf cochléaire au-dessus et du glosso-pharyngien en bas, centré sur le plexus choroïde.

Une autre possibilité de localisation du récessus du IVème ventricule est de demander à l'équipe anesthésique de réaliser une manœuvre de Valsalva par pression abdominale de façon à l'identifier par une issue de liquide céphalorachidien. Le porte-électrodes est alors introduit dans le récessus, face portante des électrodes dirigée vers le toit de celui-ci. Il doit donc suivre une angulation vers le haut.

Le placement du porte-électrodes étant jugé optimal par le neurochirurgien une série de mesures électrophysiologiques est réalisée. Leur but est double :

- d'une part, déterminer si l'application d'une stimulation des électrodes s'accompagne d'une réponse de type auditive au recueil des potentiels évoqués, et si cela est le cas pour quel nombre d'électrodes ;
- d'autre part, vérifier que l'application des stimulations électriques ne s'accompagne pas d'effet adverse sur d'autres structures nerveuses de voisinage. Ces effets sont détectés par le monitoring des nerfs crâniens IX et XI ainsi que par le suivi cardiorespiratoire par l'équipe anesthésique.

Les stimulations sont réalisées sur les électrodes, 2 à 2 en inversant la polarité. Trois types de courbes sont potentiellement obtenus lors du recueil des potentiels évoqués électriques (PEE) avec l'implant auditif du tronc cérébral : des courbes à 3 ondes (P1, P2 et P3), des courbes à 2 ondes (P1, P2), et des courbes à 1 onde (P1) (fig. 3).

À ce stade de l'intervention, la confrontation des données anatomiques et des réponses électrophysiologiques conduit soit à laisser le porte-électrodes en place, soit à le mobiliser pour essayer d'optimiser son placement. Une fois le site optimal validé, le porte-électrodes est bloqué par des fragments de tissu adipeux prélevés au niveau abdominal et le récepteur sous cutané est fixé.

En postopératoire, un scanner de contrôle permet de vérifier l'absence de complication immédiate et de contrôler la position du porte-électrode dans le récessus du IVème ventricule. Il est réalisé dans les cinq jours qui suivent l'intervention ou immédiatement en cas de suspicion de complication.

Activation et réglages des électrodes

L'activation des électrodes est réalisée sous surveillance anesthésique. En effet, en postopératoire le porte-électrode a

pu se déplacer. La procédure habituelle comporte la mise en place d'une voie veineuse, une surveillance cardiaque au scope, une mesure régulière de la pression artérielle et une surveillance de la saturation en oxygène par capteur digital. Les électrodes sont alors stimulées une à une avec comme objectif de déterminer la présence de réponses auditives et leur seuil de détection. En l'absence de réponse auditive, différents effets collatéraux peuvent être rencontrés : paresthésies, stimulation faciale, douleurs plus ou moins localisées, vertiges. Leur apparition conduit à ne pas activer les électrodes en cause. L'étape suivante est de déterminer pour chaque électrode activée les seuils de détection et d'intensité maximale, et de déterminer la tonotopie des électrodes.

Indications

Au cours de la Neurofibromatose de type 2

L'indication princeps de l'implant auditif du tronc cérébral est la NF2 (4-7). La complexité de cette affection en termes de multiplicité des lésions, d'hétérogénéité de leur extension et de leur évolutivité ne permet pas de proposer une stratégie thérapeutique standardisée. La prise en charge par une structure multidisciplinaire impliquée dans cette maladie rare permet de fixer les indications au cas par cas. Si une implantation cochléaire est anatomiquement et fonctionnellement possible (test au promontoire positif), cette solution doit être privilégiée pour des tumeurs de petite taille non évolutives. Dans le cas contraire, l'indication dépend essentiellement de la taille tumorale et de la croissance lésionnelle. La tumeur la plus volumineuse devant être opérée en premier, la mise en place d'un implant est proposée dans le même temps. S'il persiste une audition controlatérale utile, il n'est pas certain que cet implant soit immédiatement utile. Cependant, son activation et son utilisation contribuent à préparer ce mode de communication dans le cas où l'évolution se ferait vers une altération auditive controlatérale, spontanée ou en conséquence d'une intervention d'exérèse. La radiothérapie préalable, bien qu'inadaptée au traitement de la NF2 par le risque de transformation maligne ultérieure, ne constitue pas une contre-indication (8).

Autres indications

Les résultats obtenus avec l'implant auditif du tronc cérébral ont conduit à proposer cette modalité de réhabilitation auditive dans les cas de surdité totale bilatérale, sans possibilité d'implantation cochléaire : ossification cochléaire postménin-gitique (9), agénésie des nerfs cochléaires (10). Actuellement, chez l'adulte, ces indications sont :

- ossification cochléaire bilatérale, post ménin-gitique le plus souvent, avec échec ou impossibilité d'implantation cochléaire ;
- séquelles de fractures des deux rochers ;
- modifications anatomiques majeures de la cochlée plus ou moins étendues au rocher, rendant l'implantation cochléaire impossible ou dangereuse par risque de fuite de LCR : otospongiose évoluée, malformations congénitales, tumeurs du rocher... ;
- association d'un schwannome vestibulaire à une surdité congénitale ou acquise controlatérale très ancienne.

Résultats

Les modalités d'évaluation du bénéfice obtenu avec l'implant auditif du tronc cérébral sont les mêmes que celles utilisées pour l'implant cochléaire : reconnaissance de mots et de

phrases, en liste ouverte, avec et sans le support de la lecture labiale, tests de reconnaissance de bruits de la vie quotidienne. D'une manière générale ils ne sont pas toujours comparables à ceux de l'implant cochléaire.

Les données publiées dans la littérature (11-14) permettent globalement de distinguer trois catégories de résultats :

- le bénéfice est comparable à celui obtenu chez les implantés cochléaires : communication possible sans le support de la lecture labiale ;
- amélioration de la compréhension avec le support impératif de la lecture labiale ;
- absence de bénéfice : perceptions auditives faibles ou nulles.

Dans le cadre de la NF2, les facteurs pronostiques identifiés sont : la durée de la privation auditive du côté implanté, la taille tumorale et les suites opératoires. Cette chirurgie est parfois à l'origine de complications potentiellement graves, voire mortelles (méningite, hématome de l'angle pontocérébelleux, embolie pulmonaire) du fait de la durée des interventions et des pathologies associées.

Chez les patients souffrant de NF2 avec des troubles sensoriels associés, en particulier visuels mais aussi neurologiques, l'implantation auditive du tronc cérébral permet de restaurer un moyen unique de communication, qui même s'il est réduit au seul sens d'alerte est essentiel.

L'existence d'une intervention antérieure d'exérèse de schwannome vestibulaire ou d'une irradiation préalable de celui-ci, ne sont pas des facteurs pronostiques péjoratifs (8, 12).

Dans les indications autres que celles d'une NF2 les résultats globaux sont globalement meilleurs (9,10, 15, 16).

Les études réalisées en imagerie fonctionnelle ont montré une activation des aires corticales dédiées à la reconnaissance de la parole chez des patients porteurs d'implant auditif du tronc cérébral, comparable à celles observées après implantation cochléaire (17, 18).

Chez un patient ayant un schwannome vestibulaire associé à une surdité controlatérale ancienne ou congénitale, le choix de l'implantation cochléaire ou du tronc cérébral est à discuter au cas par cas.

Étude clinique

Dans une série de 52 patients pris en charge à l'hôpital Beaujon entre 1996 et 2010, âgés de 14 à 72 ans, les indications étaient : NF2 (42 cas), ossification cochléaire postméningitique (4 cas), schwannome vestibulaire avec surdité controlatérale (3 cas) ou tumeur ou malformation de l'oreille interne (3 cas).

Au cours de la NF2, l'analyse des résultats de 23 patients montre que :

- les résultats les meilleurs, caractérisés en situation de test par une compréhension de plus de la moitié des mots et des phrases sans contexte, avec l'implant seul et sans le support de la lecture labiale, ont été obtenus chez neuf patients qui avaient des durées de privation auditive brèves, des tumeurs de taille inférieure à 3 cm et au moins 10 électrodes actives avec des sensations auditives ;
- dans sept cas, ce niveau de compréhension est obtenu en associant la lecture labiale aux informations fournies par l'implant du tronc. Il s'agit de patients avec des durées de surdités profondes plus longues, des tumeurs mesurant plus de 3 cm et moins de 10 électrodes actives avec des sensations auditives ainsi que des handicaps associés, en particulier visuels ;
- dans sept autres cas, les patients ont un bénéfice limité avec des perceptions sonores sans amélioration de l'intelligibilité, permettant le sens d'alerte. Ils avaient des éléments de mauvais pronostic :
 - tumeur mesurant plus de 3 cm et/ou intervention sur le

premier côté avec tumeur controlatérale volumineuse ;

- suites opératoires compliquées (chute, méningite, embolie pulmonaire) ;
- forme évolutive de la NF2 (méningiomes, lésions médullaires...).

Dans les autres cas, l'utilisation de l'implant est limitée soit du fait de la conservation d'une audition controlatérale permettant un niveau de compréhension élevé, soit du fait de l'absence de réponse auditive lors de l'activation des électrodes.

Enfin deux patients souffrant de NF2 utilisent un implant du tronc bilatéral, ce qui permet une restauration des capacités de localisation spatiale.

Dans les cas d'ossification cochléaire postméningitique, les résultats obtenus avec l'implant du tronc cérébral sont comparables à ceux obtenus avec l'implant cochléaire au cours des surdités postméningitiques, sans ossification cochléaire (18).

Conclusions

L'implantation auditive du tronc cérébral permet de réhabiliter les surdités non accessibles à une implantation cochléaire. Lors de la NF2, en cas d'impossibilité à réaliser une implantation cochléaire, l'implantation du tronc cérébral peut être proposée afin de restaurer l'accès aux signaux sonores. Dans le cas de la NF2 avec tumeurs volumineuses, les données anatomiques peropératoires font décider ou non de l'implantation dans le même temps. En cas de conservation d'une audition controlatérale « utile », pertinente en termes de communication, l'indication est à discuter au cas par cas.

Les résultats obtenus ont permis d'élargir les indications au-delà de la NF2. Cette technique impose une équipe chirurgicale et une équipe d'implantation spécialisées, ce qui limite le nombre de centres la réalisant.

Les perspectives sont, d'une part, l'optimisation de la stimulation par les électrodes, en modifiant leur configuration ou leurs paramètres de réglages, et, d'autre part, la discussion de l'élargissement à d'autres indications dans le domaine pédiatrique (aplasie du nerf cochléaire, par exemple).

Références

1. Edgerton BJ, House WF, Hitselberger W. Hearing by cochlear nucleus stimulation in humans. *Ann Otol Rhinol Otolaryngol* 1982 ; 91 (Suppl) : 117-24.
2. Hitselberger W, House WF, Edgerton BJ, Whitaker S. Cochlear Nucleus implant. *Otolaryngol Head Neck Surg* 1984 ; 92 : 52-4.
3. Frohne C, Matthies C, Lesinski-Schiedat A, Battmer RD, Samii M, Lenarz T. Extensive monitoring during auditory brainstem implant surgery. *J Laryngol Otol Suppl* 2000 ; (27) : 11-4.
4. Lenarz T, Moshrefi M, Matthies C, Frohne C, Lesinski-Schiedat A, Illg A, et al. Auditory brainstem implant: part I. Auditory performance and its evolution over time. *Otol Neurotol* 2001 ; 22 : 823-33.
5. Lenarz M, Matthies C, Lesinski-Schiedat A, Frohne C, Rost U, Illg A, et al. Auditory brainstem implant part II: subjective assessment of functional outcome. *Otol Neurotol* 2002 ; 23 : 694-7.
6. Kanowitz SJ, Shapiro WH, Golfinos JG, Cohen NL, Roland JT Jr. Auditory brainstem implantation in patients with neurofibromatosis type 2. *Laryngoscope* 2004 ; 114 : 2135-46.
7. HAS. Traitement de la surdité par pose d'implants cochléaires ou d'implants du tronc cérébral. Recommandation de la Haute Autorité de Santé. Mai 2007 (Site internet HAS).
8. Kalamirides M, Bozorg Grayeli A, Bouccara D, Ambert-Dahan E, Sollmann WP, Sterkers O, Rey A. Hearing restoration with auditory brainstem implants after radiosurgery for neurofibromatosis Type 2. Report of three cases. *J Neurosurg* 2001 ; 95 : 1028-33.
9. Grayeli AB, Bouccara D, Kalamirides M, Ambert-Dahan E, Coudert C, Cyna-Gorse F, et al. Auditory Brainstem Implant in Bilateral and completely ossified cochleae. *Otol Neurotol* 2003 ; 24 : 79-82.
10. Colletti V, Carner M, Fiorino F, Sacchetto L, Miorelli V, Orsi A, et al. Hearing restoration with auditory brainstem implant in three

- children with cochlear nerve aplasia. *Otol Neurotol* 2002 ; 23 : 682-93.
11. Lesinski-Schiedat A, Frohne C, Illg A, Rost U, Matthies C, Battmer RD, et al. Auditory brainstem implant in auditory rehabilitation of patients with neurofibromatosis type 2: Hannover programme. *J Laryngol Otol Suppl* 2000 ; 27 : 15-7.
 12. Wu H, Kalamarides M, Bouccara D, Dahan EA, Sollmann WP, Viala P, et al. Nucleus 21-channel auditory brainstem implant in patients with previous tumour removal. *Audiology* 2000 ; 39 : 247-52.
 13. Nevison B, Laszig R, Sollmann WP, Lenarz T, Sterkers O, Ramsden R, et al. Results from a European clinical investigation of the Nucleus multichannel auditory brainstem implant. *Ear Hear* 2002 ; 23 : 170-83.
 14. Bouccara D, Kalamarides M, Bozorg Grayeli A, Ambert-Dahan E, Rey A, Sterkers O. Implant auditif du tronc cérébral: indications et résultats. *Ann Otolaryngol Chir Cervicofac* 2007 ; 124 : 148-54.
 15. Bozorg Grayeli A, Kalamarides M, Bouccara D, Ambert-Dahan E, Sterkers O. Auditory brainstem implant in neurofibromatosis type 2 and non-neurofibromatosis type 2 patients. *Otol Neurotol* 2008 ; 29 : 1140-6.
 16. Bozorg Grayeli A, Kalamarides M, Bouccara D, Ben Gamra L, Ambert-Dahan E, Sterkers O. Auditory brainstem implantation to rehabilitate profound hearing loss with totally ossified cochleae induced by pneumococcal meningitis. *Audiol Neurootol* 2007 ; 12 : 27-30.
 17. Coez A, Zilbovicius M, Ferrary E, Bouccara D, Mosnier I, Ambert-Dahan E, et al. Cochlear implant benefits in deafness rehabilitation: PET study of temporal voice activations. *J Nucl Med* 2008 ; 49 : 60-7.
 18. Coez A, Zilbovicius M, Ferrary E, Bouccara D, Mosnier I, Ambert-Dahan E, et al. Processing of voices in deafness rehabilitation by auditory brainstem implant. *Neuroimage* 2009 ; 47 : 1792-6.