

Réhabilitation de la surdité profonde par l'implant cochléaire uni- ou bilatéral chez l'adulte sourd post-lingual

Deep deafness rehabilitation by uni- or bilateral cochlear implantation in post-lingual deaf adults

O Sterkers [1, 2, 3], B Meyer [1, 4], B Frachet [1, 5], A Bozorg Grayeli [1, 2, 3], I Mosnier [1], DS Lazard [1, 5].

1. AP-HP, Hôpital Beaujon, Service d'ORL et de chirurgie cervico-faciale, Centre référent d'Île-de-France d'implantation cochléaire et d'implantation du tronc cérébral pour les adultes
2. Inserm UMR-S 867 « Chirurgie otologique mini-invasive robotisée »
3. Université Diderot - Paris VII
4. Université Pierre & Marie Curie - Paris VI
5. Université Paris Nord XIII
6. Ecole Normale Supérieure, Inserm U960 : Laboratoire de neurosciences cognitives

Mots clés

- ◆ Tonotopie
- ◆ Codage électrique
- ◆ Tympanotomie postérieure
- ◆ Cochléostomie
- ◆ Explantation
- ◆ Binaural
- ◆ Cognitif

Résumé

Djourno et Eyries ont mis en évidence en 1957 que la stimulation électrique de la cochlée entraînait des réponses auditives chez un patient sourd total implanté. En 1976, CH Chouard a réalisé la première implantation multi-fréquentielle permettant de comprendre à nouveau la parole. Des avancées déterminantes ont permis de restaurer l'audition avec une grande fiabilité du dispositif médical et un bénéfice du patient prouvé par une communication orale performante grâce à des traitements du signal de plus en plus adaptés. Plus de 200 000 sourds profonds ont été implantés dans le monde jusqu'à présent, et environ 800 patients par an bénéficient de cette technique en France. L'implantation cochléaire est encadrée par les recommandations de la Haute Autorité de santé, et la chirurgie d'implantation est bien réglée dans des groupes pratiquant de 50 à plus de 100 implantations cochléaires par an, comme dans notre centre. L'implantation cochléaire unilatérale offre des performances auditives satisfaisantes dans les milieux peu bruyants. La compréhension dans le bruit est nettement améliorée par une implantation bilatérale qui permet une réinsertion professionnelle et une amélioration de la qualité de la vie. L'implantation cochléaire bilatérale peut être réalisée dans le même temps chirurgical lorsqu'il existe un risque d'ossification cochléaire ultérieure, en particulier après méningite bactérienne. La réhabilitation de la surdité profonde et du handicap de communication qu'elle occasionne peut être proposée dès que l'intelligibilité s'effondre d'un côté et que la compréhension contralatérale est limitée avec une prothèse auditive, afin de rétablir la communication en milieu bruyant habituel.

Keywords

- ◆ Tonotopy
- ◆ Electric processing strategy
- ◆ Posterior tympanotomy
- ◆ Cochleostomy
- ◆ Explantation
- ◆ Binaural
- ◆ Cognitive

Abstract

Djourno and Eyries showed in 1957 that electric stimulations, provided to the cochlea, created auditory responses to a profoundly deaf patient. In 1976, CH Chouard performed the first multi-channel implantation reestablishing speech comprehension. Since, major technical findings allowed auditory restoration with high device reliability and efficient oral communication thanks to improved signal processing strategies. More than 200 000 profoundly deaf patients were implanted worldwide. In France where cochlear implantation is supervised by la Haute Autorité de santé, about 800 candidates are operated on each year. Surgical procedure is well codified in centers performing from 50 to more than 100 implantations per year, like in our center. After unilateral cochlear implantation, speech performance is satisfactory in silent environment. In noisy environment, outcome is clearly enhanced by bilateral cochlear implantation, yielding professional reinsertion and enhanced life quality. Bilateral cochlear implantation may be performed simultaneously when cochlear ossification is suspected, e.g. after bacterial meningitis. Profound deafness rehabilitation may be proposed to palliate the handicap it creates as soon as intelligibility collapses on one side and if comprehension is limited on the other side despite hearing aid, thus restoring oral communication in noisy environment.

L'implant cochléaire (IC) est une des révolutions médicales de ces cinquante dernières années grâce à la restauration d'une communication orale de bonne qualité dans le silence, à des sujets devenus sourds sévères à profonds ayant auparavant acquis le langage ou à des enfants sourds congénitaux. L'IC

existe depuis les années 1970 et n'a pas cessé de s'améliorer, permettant à un nombre croissant de sujets de bénéficier de cette technique (146 patients ont été implantés en 2009 à l'Hôpital Beaujon). Les indications se sont élargies offrant, dans certaines situations, la possibilité d'implanter les pa-

Correspondance :

O. Sterkers, AP-HP, Hôpital Beaujon, Service d'ORL et de chirurgie cervico-faciale, Centre référent d'Île-de-France d'implantation cochléaire et d'implantation du tronc cérébral pour les adultes

tients de façon bilatérale. La recherche a également permis de comprendre les avantages de promouvoir le maintien du port de la prothèse conventionnelle controlatérale et ceux de promouvoir la réhabilitation cognitive.

Historique de l'implant cochléaire

L'idée de reproduire une sensation auditive à partir d'une stimulation électrique remonte à la fin du XVIIIe siècle mais le premier implant stimulant directement le nerf auditif apparaît en France en 1957. Il fut l'œuvre de A. Djourno et C. Eyriès (1). Une discrimination des sons environnementaux avec restauration des fonctions d'alerte fut possible mais sans discrimination de parole (2). Un principe similaire d'implant mono-électrode fut développé par W. House en Californie quatre ans plus tard, avec les mêmes résultats. C'est en 1964 que B. Simmons commence à développer un implant multi-électrodes (six électrodes). Sans obtenir de compréhension de parole, il démontre que l'utilisation de sites de stimulation multiples à l'intérieur de la cochlée permet la discrimination de hauteur. Le premier implant mono-électrode est commercialisé en 1972 par W. House. En 1976, P Pialoux, CH Chouard et P MacLeod publient le premier article sur une série de sept patients implantés avec un implant 8-canaux offrant une compréhension de 50 % de mots sans lecture labiale (3, 4). En 1988, une Conférence de consensus sous l'égide du *National Institute of Health* entérine les implants multi-canaux au détriment du mono-canal (5). À cette époque, il était estimé que 3 000 patients avaient déjà bénéficié d'un IC. En 1995, ils étaient, dans le monde, 12 000, en 2008 120 000, en 2010 200 000. Cette croissance démontre les progrès obtenus en termes de performances et l'élargissement des indications (6).

Indications actuelles de l'implant cochléaire en France chez l'adulte

Les indications d'un implant cochléaire définies par la Haute Autorité de santé (HAS, www.has-sante.fr) concernent les surdités neurosensorielles sévères à profondes, bilatérales, sans bénéfice d'un appareillage auditif conventionnel (acoustique) optimal dont l'essai est nécessaire avant de proposer une chirurgie. La discrimination en audiométrie vocale doit être inférieure ou égale à 50 % lorsque le stimulus est présenté à 65 décibels, en champ libre, malgré le port de prothèses auditives adaptées. Le matériel vocal utilisé doit être adapté à la population testée (mots dissyllabiques des listes de Fournier pour des adultes de langue maternelle française).

Les implants électro-acoustiques combinent une stimulation électrique et acoustique sur une même oreille. Ils s'adressent à des patients ayant une audition résiduelle sur les fréquences graves mais qui remplissent les critères audiométriques suscités. Une attention particulière doit être portée à l'évolution de la surdité au cours du temps et à la persistance d'une audition résiduelle efficace. La chirurgie doit alors préserver les restes auditifs utiles.

Chez l'adulte, toute surdité acquise en période post-linguale et répondant aux critères audiométriques, est acceptée comme indication : il n'y a pas de limite d'âge, sous couvert et sous réserve d'une évaluation psychocognitive.

En France, l'implantation bilatérale est pratiquée dans des cas particuliers. Les indications reconnues par la HAS pour une chirurgie bilatérale sont actuellement :

- les étiologies de surdité pouvant conduire à une ossification cochléaire dans de brefs délais : les labyrinthites, les fractures bilatérales du rocher. Il est alors proposé une implantation simultanée (en un temps) ;
- le syndrome de Usher (surdité neurosensorielle et rétinopa-

thie). L'implantation est simultanée chez l'enfant, elle peut être séquentielle chez l'adulte s'il existe des restes auditifs asymétriques ;

- la perte du bénéfice audioprothétique controlatéral chez un adulte implanté de façon unilatérale, pouvant entraver la vie socioprofessionnelle ou engendrer une perte d'autonomie chez le sujet âgé (implantation séquentielle).

Les différents types d'implant et leur choix

Il existe quatre fabricants d'IC : *Advanced Bionics* (Valencia, États-Unis), *Cochlear* (Sydney, Australie), *MED-EL* (Innsbruck, Autriche), *Neurelec-MXM* (Vallauris, France). Chacun possède des stratégies de codage propres mais, pour simplifier, il est possible de dire que, de façon commune, le signal auditif est filtré en bandes fréquentielles au cours du temps. L'énergie mesurée dans chaque bande sert à moduler un train d'impulsions. Ces bandes fréquentielles sont attribuées aux électrodes correspondantes en fonction de leur cartographie tonotopique. En effet, la cochlée présente une représentation fréquentielle spécialisée de sa base à son apex, allant des fréquences aiguës aux fréquences graves. Les trains d'impulsions sont échelonnés dans le temps pour éviter des interactions entre des champs électriques d'électrodes trop proches spatialement. L'IC ne transmet que l'enveloppe temporelle et spectrale du son, correspondant aux variations lentes de l'énergie calculée dans chaque bande fréquentielle. Ainsi, l'IC offre assez d'information pour comprendre la parole dans le silence (7, 8), mais se révèle décevant pour les codages plus complexes, comme la parole dans le bruit (8, 9) ou la musique (10). De plus, on sait que la binauralité (le fait d'avoir des informations acoustiques venant des deux oreilles) améliore la compréhension dans le bruit du fait de mécanismes de démasquage, d'additivité centrale et de localisation sonore par interprétation des différences interaurales de temps et d'intensité (11). L'implantation unilatérale prive les patients de ces informations, une implantation bilatérale simultanée améliore considérablement les performances de discrimination dans le bruit ainsi que la localisation sonore spatiale (12).

Le choix des appareils est laissé à l'appréciation des équipes. La prise en charge d'un patient est multidisciplinaire incluant des ORL, chirurgiens et audiologistes, des orthophonistes, des psychologues. Les indications sont posées en général après concertation entre les membres de l'équipe. Le suivi postopératoire est primordial, nécessitant des réglages réguliers et une rééducation orthophonique spécialisée.

La chirurgie

L'acte chirurgical d'implantation est réglé et présente des complications rares. La chirurgie se fait sous anesthésie générale par une incision rétro-auriculaire de petite taille. Est réalisée une ouverture de l'antra (cellule la plus large de la mastoïde) au moteur, permettant de réaliser une tympanotomie postérieure. Cette ouverture postérieure de la caisse de l'oreille moyenne permet d'aborder la cochlée au niveau de son tour basal, en regard de la fenêtre ronde. Le porte-électrodes peut être introduit soit par la fenêtre ronde, après incision de sa membrane, soit par réalisation au micromoteur d'une cochléostomie (ouverture du canal cochléaire en regard de la rampe tympanique) (13, 14). Les techniques micro-invasives d'introduction de l'électrode sont pratiquées de façon systématique dans le but de préserver les restes auditifs dans les fréquences graves à l'apex cochléaire (15, 16). Le porte-électrodes est introduit si possible dans son intégralité, à l'intérieur de la cochlée, le plus près possible du *modiolus* (17), à l'intérieur de la rampe tympanique (par opposition à la rampe vestibulaire), ce positionnement offrant de meilleures

performances (18, 19).

Dans une série rétrospective incluant des adultes et des enfants, le taux de complications a été évalué à 16 %, comprenant 5,6 % de complications considérées comme mineures, 3,2 % de complications considérées comme majeures, et 7,2 % de réimplantations, principalement chez l'enfant (20). Les cas de méningites à distance du geste chirurgical sont devenus exceptionnels (118 cas sur 60 000, soit 0,2 %) (21). Tous les patients bénéficient d'une vaccination préventive contre le pneumocoque (21). La chirurgie sous monitoring du nerf facial n'entraîne que de rares parésies faciales (0,7 %) (22), régressives. Les explantations sont peu fréquentes (23) et sont secondaires, dans 78 % des cas, à des dysfonctionnements des appareils. Les troubles trophiques cutanés/infections, engendrant un risque d'exposition du dispositif, représentent moins de 2 % des complications (20).

Les résultats chez l'adulte sourd post-lingual

Les performances obtenues avec un IC sont désormais très bonnes dans le silence, avec 30 % des patients obtenant plus de 95 % de réponses justes dans des tâches de discrimination de phrases (6). La reconnaissance de mots dissyllabiques est également performante avec une médiane à 70 % à 1 an, un premier quartile à 50 % et un dernier quartile à 95 % (24). L'adjonction de la lecture labiale augmente considérablement les performances. La proportion de patients en échec de l'implantation (scores de reconnaissance inférieurs à 10 %) est difficile à évaluer. Elle serait autour de 10 % (25).

L'implantation bilatérale offre un accès à la stéréophonie et donc à la localisation spatiale et améliore de façon significative la compréhension dans le bruit (12). Lorsque les performances sont insuffisantes avec un premier IC, le bénéfice d'une implantation controlatérale séquentielle est majeur (12).

Le maintien du port d'une prothèse auditive controlatérale est préconisé tant qu'elle apporte des bénéfices auditifs, même mineurs. La stimulation bimodale (électrique et acoustique en même temps) a montré un avantage sur le développement du langage chez l'enfant, la perception de la parole dans le bruit et la qualité de la perception musicale (26-31). Ces bénéfices sont dus à la transmission par la prothèse auditive conventionnelle d'indices temporels et spectraux contenus dans les fréquences graves, et en particulier ceux de la structure fine, qui font défaut dans le codage de l'IC (32). L'implant et la prothèse transmettent des indices acoustiques complémentaires, dont la synergie est à promouvoir.

Les facteurs prédictifs, périphériques et centraux, des performances

La durée de privation auditive est un élément prédictif majeur (33, 34) mais elle n'explique que partiellement les résultats (35-39). D'autres facteurs prédictifs ont été avancés comme la trophicité nerveuse périphérique (40), la position du porte-électrodes (18), sa longueur et son angle d'insertion (41). Ces facteurs périphériques jouent un rôle important dans les performances mais il est désormais acquis que le système nerveux central tient un rôle primordial dans la compréhension du message délivré par l'IC (42) : même si tous les pré-requis périphériques à une « bonne utilisation » sont remplis, une afférentation corticale auditive correcte (43, 44) et une bonne coopération audio-visuelle (45, 46) sont indispensables pour extraire du son dénaturé de l'IC une information signifiante (42).

Conclusion

L'IC améliore considérablement la qualité de vie des patients qui en bénéficient, en restaurant une communication orale et la possibilité d'une vie sociale et professionnelle. Ses indications se sont élargies au cours du temps, prenant en compte l'audition résiduelle et la possibilité d'une implantation bilatérale. La nécessité d'insérer le porte-électrodes dans la *scala tympani* de façon la plus atraumatique possible amène à développer la robotisation de cet acte chirurgical (47). De tels progrès techniques ainsi que la compréhension du rôle des facteurs cognitifs dans les performances de l'IC sont encore à faire mais ouvrent des voies prometteuses (42, 48).

Références

- Djourno A, Eyries C. [Auditory prosthesis by means of a distant electrical stimulation of the sensory nerve with the use of an indwelled coiling.]. Presse Med 1957 ; 65 : 1417.
- Chouard CH, MacLeod P. [Letter: Rehabilitation of total deafness. Trial of cochlear implantation with multiple electrodes]. Nouv Presse Med 1973 ; 2 : 2958.
- Chouard CH, MacLeod P. Implantation of multiple intracochlear electrodes for rehabilitation of total deafness: preliminary report. Laryngoscope 1976 ; 86 : 1743-51.
- Pialoux P, Chouard CH, MacLeod P. Physiological and clinical aspects of the rehabilitation of total deafness by implantation of multiple intracochlear electrodes. Acta Otolaryngol 1976 ; 81 : 436-41.
- Cochlear implants. Natl Inst Health Consens Dev Conf Consens Statement 1988 ; 7 : 1-9.
- Wilson BS, Dorman MF. Cochlear implants: a remarkable past and a brilliant future. Hear Res 2008 ; 242 : 3-21.
- Zeng FG. Trends in cochlear implants. Trends Amplif 2004 ; 8 : 1-34.
- Zeng FG, Nie K, Stickney GSet al. Speech recognition with amplitude and frequency modulations. Proc Natl Acad Sci U S A 2005 ; 102 : 2293-8.
- Nelson PB, Jin SH, Carney AE, Nelson DA. Understanding speech in modulated interference: cochlear implant users and normal-hearing listeners. J Acoust Soc Am 2003 ; 113 : 961-8.
- Milczynski M, Wouters J, van Wieringen A. Improved fundamental frequency coding in cochlear implant signal processing. J Acoust Soc Am 2009 ; 125 : 2260-71.
- Culling JF, Hawley ML, Litovsky RY. The role of head-induced interaural time and level differences in the speech reception threshold for multiple interfering sound sources. J Acoust Soc Am 2004 ; 116 : 1057-65.
- Mosnier I, Sterkers O, Bebear JP, Godey B, Robier A, Deguine O, et al. Speech performance and sound localization in a complex noisy environment in bilaterally implanted adult patients. Audiol Neurootol 2009 ; 14 : 106-14.
- Roland PS, Wright CG. Surgical aspects of cochlear implantation: mechanisms of insertional trauma. Adv Otorhinolaryngol 2006 ; 64 : 11-30.
- Friedland DR, Runge-Samuelson C. Soft cochlear implantation: rationale for the surgical approach. Trends Amplif 2009 ; 13 : 124-38.
- James C, Albegger K, Battmer Ret al. Preservation of residual hearing with cochlear implantation: how and why. Acta Otolaryngol 2005 ; 125 : 481-91.
- Frayse B, Macías AR, Sterkers O, Burdo S, Ramsden R, Deguine O, et al. Residual hearing conservation and electroacoustic stimulation with the nucleus 24 contour advance cochlear implant. Otol Neurotol 2006 ; 27 : 624-33.
- Cohen LT, Saunders E, Knight MR, Cowan RS. Psychophysical measures in patients fitted with Contour and straight Nucleus electrode arrays. Hear Res 2006 ; 212 : 160-75.
- Finley CC, Holden TA, Holden LK, Whiting BR, Chole RA, Neely GJ, et al. Role of electrode placement as a contributor to variability in cochlear implant outcomes. Otol Neurotol 2008 ; 29 : 920-8.
- Skinner MW, Ketten DR, Holden LK, Harding GW, Smith PG, Gates GA, et al. CT-derived estimation of cochlear morphology and electrode array position in relation to word recognition in Nucleus-22 recipients. J Assoc Res Otolaryngol 2002 ; 3 : 332-50.
- Venail F, Sicard M, Piron JP, Levi A, Artieres F, Uziel A, et al. Reliability and complications of 500 consecutive cochlear

- implantations. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg* 2008 ; 134 : 1276-81.
21. Wei BP, Robins-Browne RM, Shepherd RK, Clark GM, O'Leary SJ. Can we prevent cochlear implant recipients from developing pneumococcal meningitis? *Clin Infect Dis* 2008 ; 46 : e1-7.
 22. Mosnier I, Ambert-Dahan E, Smadja M, Ferrary E, Bouccara D, Bozorg-Grayeli A, et al. [Performances and complications of cochlear implant in 134 adult patients implanted since 1990]. *Ann Otolaryngol Chir Cervicofac* 2006 ; 123 : 71-8.
 23. Brown KD, Connell SS, Balkany TJ, Eshraghi AE, Telischi FF, Angeli SA. Incidence and indications for revision cochlear implant surgery in adults and children. *Laryngoscope* 2009 ; 119 : 152-7.
 24. Lazard DS, Bordure P, Lina-Granade G, Magnan J, Meller R, Meyer B, et al. Speech perception performance for 100 post-lingually deaf adults fitted with Neurelec cochlear implants: Comparison between Digisonic® Convex and Digisonic® SP devices after a 1-year follow-up. *Acta Otolaryngol* 2010 ; 130 : 1267-73.
 25. Bodmer D, Shipp DB, Ostroff JM, Ng AH, Stewart S, Chen JM, Nedzelski JM. A comparison of postcochlear implantation speech scores in an adult population. *Laryngoscope* 2007 ; 117 : 1408-11.
 26. Nittroer S, Chapman C. The effects of bilateral electric and bimodal electric--acoustic stimulation on language development. *Trends Amplif* 2009 ; 13 : 190-205.
 27. Mok M, Galvin KL, Dowell RC, McKay CM. Speech perception benefit for children with a cochlear implant and a hearing aid in opposite ears and children with bilateral cochlear implants. *Audiol Neurootol* 2010 ; 15 : 44-56.
 28. Olson AD, Shinn JB. A systematic review to determine the effectiveness of using amplification in conjunction with cochlear implantation. *J Am Acad Audiol* 2008 ; 19 : 657-71 ; quiz 735.
 29. El Fata F, James CJ, Laborde ML, Fraysse B. How much residual hearing is 'useful' for music perception with cochlear implants? *Audiol Neurootol* 2009 ; 14 (Suppl 1) : 14-21.
 30. Sucher CM, McDermott HJ. Bimodal stimulation: benefits for music perception and sound quality. *Cochlear Implants Int* 2009 ; 10 (Suppl 1) : 96-9.
 31. Schafer EC, Amlani AM, Seibold A, Shattuck PL. A meta-analytic comparison of binaural benefits between bilateral cochlear implants and bimodal stimulation. *J Am Acad Audiol* 2007 ; 18 : 760-76.
 32. Gnansia D, Pressnitzer D, Péan V, Meyer B, Lorenzi C. Intelligibility of interrupted and interleaved speech for normal-hearing listeners and cochlear implantees. *Hear Res* 2010 ; 265 : 46-53.
 33. O'Donoghue GM, Nikolopoulos TP, Archbold SM. Determinants of speech perception in children after cochlear implantation. *Lancet* 2000 ; 356 : 466-8.
 34. Sarant JZ, Blamey PJ, Dowell RC, Clark GM, Gibson WP. Variation in speech perception scores among children with cochlear implants. *Ear Hear* 2001 ; 22 : 18-28.
 35. Giraud AL, Lee HJ. Predicting cochlear implant outcome from brain organisation in the deaf. *Restor Neurol Neurosci* 2007 ; 25 : 381-90.
 36. Blamey P, Arndt P, Bergeron F, Bredberg G, Brimacombe J, Facer G, et al. Factors affecting auditory performance of postlinguistically deaf adults using cochlear implants. *Audiol Neurootol* 1996 ; 1 : 293-306.
 37. Green KM, Bhatt YM, Mawman DJ, O'Driscoll MP, Saeed SR, Ramsden RT, Green MW. Predictors of audiological outcome following cochlear implantation in adults. *Cochlear Implants Int* 2007 ; 8 : 1-11.
 38. Proops DW, Donaldson I, Cooper HR, Thomas J, Burrell SP, Stoddart RL, et al. Outcomes from adult implantation, the first 100 patients. *J Laryngol Otol Suppl* 1999 ; 24 : 5-13.
 39. van Dijk JE, van Olphen AF, Langereis MC, Mens LH, Brox JP, Smoorenburg GF. Predictors of cochlear implant performance. *Audiology*. 1999 ; 38 : 109-16.
 40. Nadol JB Jr, Eddington DK. Histopathology of the inner ear relevant to cochlear implantation. *Adv Otorhinolaryngol* 2006 ; 64 : 31-49.
 41. Escudé B, James C, Deguine O, Cochard N, Eter E, Fraysse B. The size of the cochlea and predictions of insertion depth angles for cochlear implant electrodes. *Audiol Neurootol* 2006 ; 11 Suppl 1 : 27-33.
 42. Moore DR, Shannon RV. Beyond cochlear implants: awakening the deafened brain. *Nat Neurosci* 2009 ; 12 : 686-91.
 43. 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.
 44. Lee HJ, Giraud AL, Kang E, Oh SH, Kang H, Kim CS, Lee DS. Cortical activity at rest predicts cochlear implantation outcome. *Cereb Cortex* 2007 ; 17 : 909-17.
 45. Rouger J, Lagleyre S, Fraysse B, Deneve S, Deguine O, Barone P. Evidence that cochlear-implanted deaf patients are better multisensory integrators. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2007 ; 104 : 7295-300.
 46. Tremblay C, Champoux F, Lepore F, Théoret H. Audiovisual fusion and cochlear implant proficiency. *Restor Neurol Neurosci* 2010 ; 28 : 283-91.
 47. Miroir M, Nguyen Y, Szewczyk J, et al. RobOtol : From Design to Evaluation of a Robot for Middle Ear Surgery. *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* 2010 ; in press.
 48. Lazard DS, Lee HJ, Gaebler M, Kell CA, Truy E, Giraud AL. Phonological processing in post-lingual deafness and cochlear implant outcome. *Neuroimage* 2010 ; 49 : 3443-51.