



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-thesesexercice-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

THESE

Pour obtenir le grade de
DOCTEUR EN MEDECINE

Présenté et soutenue publiquement
Dans le cadre du troisième cycle de
Médecine Spécialisée

Par
Rémy GROSJEAN
Le 17 octobre 2012

Evaluation à long terme des implants cochléaires sur le contrôle postural et l'organisation sensorielle

JURY :

Examineurs de la thèse

M. le Professeur Roger JANKOWSKI	Président
M ^{me} . le Professeur Cécile PARIETTI-WINKLER	Juge
M. le Professeur André CHAYS	Juge
M ^{me} . le Docteur Bettina MONTAUT-VERIENT	Juge
M. le Docteur Gérome GAUCHARD	Juge

UNIVERSITÉ DE LORRAINE
FACULTÉ DE MÉDECINE DE NANCY

Président de l'Université de Lorraine : Professeur Pierre MUTZENHARDT

Doyen de la Faculté de Médecine : Professeur Henry COUDANE

Vice Doyen « Pédagogie » : Professeur Karine ANGIOI
Vice Doyen *Mission « sillon lorrain »* : Professeur Annick BARBAUD
Vice Doyen *Mission « Campus »* : Professeur Marie-Christine BÉNÉ
Vice Doyen *Mission « Finances »* : Professeur Marc BRAUN
Vice Doyen *Mission « Recherche »* : Professeur Jean-Louis GUÉANT

Assesseeurs :

- 1 ^{er} Cycle :	Professeur Bruno CHENUUEL
- « Première année commune aux études de santé (PACES) et universitarisation études para-médicales »	M. Christophe NÉMOS
- 2 ^{ème} Cycle :	Professeur Marc DEBOUVERIE
- 3 ^{ème} Cycle :	
« DES Spécialités Médicales, Chirurgicales et Biologiques »	Professeur Jean-Pierre BRONOWICKI
« DES Spécialité Médecine Générale	Professeur Paolo DI PATRIZIO
- Filières professionnalisées :	M. Walter BLONDEL
- Formation Continue :	Professeur Hervé VESPIGNANI
- Commission de Prospective :	Professeur Pierre-Edouard BOLLAERT
- Recherche :	Professeur Didier MAINARD
- Développement Professionnel Continu :	Professeur Jean-Dominique DE KORWIN
Assesseeurs Relations Internationales	Professeur Jacques HUBERT

DOYENS HONORAIRES

Professeur Adrien DUPREZ – Professeur Jean-Bernard DUREUX
Professeur Jacques ROLAND – Professeur Patrick NETTER

=====

PROFESSEURS HONORAIRES

Jean-Marie ANDRE - Daniel ANTHOINE - Alain AUBREGE - Gérard BARROCHE - Alain BERTRAND - Pierre BEY
Patrick BOISSEL - Jacques BORRELLY - Michel BOULANGE - Jean-Claude BURDIN - Claude BURLET -
Daniel BURNEL - Claude CHARDOT - François CHERRIER - Jean-Pierre CRANCE - Gérard DEBRY - Jean-Pierre
DELAGOUTTE - Emile de LAVERGNE - Jean-Pierre DESCHAMPS - Jean DUHEILLE - Adrien DUPREZ - Jean-Bernard
DUREUX - Gérard FIEVE - Jean FLOQUET - Robert FRISCH - Alain GAUCHER - Pierre GAUCHER - Hubert GERARD
Jean-Marie GILGENKRANTZ - Simone GILGENKRANTZ - Oliéro GUERCI - Pierre HARTEMANN - Claude HURIET
Christian JANOT - Michèle KESSLER - Jacques LACOSTE - Henri LAMBERT - Pierre LANDES -
Marie-Claire LAXENAIRE - Michel LAXENAIRE - Jacques LECLERE - Pierre LEDERLIN - Bernard LEGRAS
Michel MANCIAUX - Jean-Pierre MALLIÉ – Philippe MANGIN - Pierre MATHIEU - Michel MERLE - Denise MONERET-
VAUTRIN - Pierre MONIN - Pierre NABET - Jean-Pierre NICOLAS - Pierre PAYSANT - Francis PENIN - Gilbert
PERCEBOIS - Claude PERRIN - Guy PETIET - Luc PICARD - Michel PIERSON - Jean-Marie POLU - Jacques POUREL
Jean PREVOT - Francis RAPHAEL - Antoine RASPILLER - Michel RENARD - Jacques ROLAND - René-Jean ROYER
Daniel SCHMITT - Michel SCHMITT - Michel SCHWEITZER - Claude SIMON - Danièle SOMMELET
Jean-François STOLTZ - Michel STRICKER - Gilbert THIBAUT - Augusta TREHEUX - Hubert UFFHOLTZ
Gérard VAILLANT - Paul VERT - Colette VIDAILHET - Michel VIDAILHET - Michel WAYOFF - Michel WEBER

=====

**PROFESSEURS DES UNIVERSITÉS
PRATICIENS HOSPITALIERS**

(Disciplines du Conseil National des Universités)

42^{ème} Section : MORPHOLOGIE ET MORPHOGENÈSE

1^{ère} sous-section : (*Anatomie*)
Professeur Gilles GROSDIDIER
Professeur Marc BRAUN

2^{ème} sous-section : *(Cytologie et histologie)*

Professeur Bernard FOLIGUET

3^{ème} sous-section : *(Anatomie et cytologie pathologiques)*

Professeur François PLENAT – Professeur Jean-Michel VIGNAUD

43^{ème} Section : BIOPHYSIQUE ET IMAGERIE MÉDICALE

1^{ère} sous-section : *(Biophysique et médecine nucléaire)*

Professeur Gilles KARCHER – Professeur Pierre-Yves MARIE – Professeur Pierre OLIVIER

2^{ème} sous-section : *(Radiologie et imagerie médicale)*

Professeur Denis REGENT – Professeur Michel CLAUDON – Professeur Valérie CROISÉ-LAURENT

Professeur Serge BRACARD – Professeur Alain BLUM – Professeur Jacques FELBLINGER

Professeur René ANXIONNAT

44^{ème} Section : BIOCHIMIE, BIOLOGIE CELLULAIRE ET MOLÉCULAIRE, PHYSIOLOGIE ET NUTRITION

1^{ère} sous-section : *(Biochimie et biologie moléculaire)*

Professeur Jean-Louis GUÉANT – Professeur Jean-Luc OLIVIER – Professeur Bernard NAMOUR

2^{ème} sous-section : *(Physiologie)*

Professeur François MARCHAL – Professeur Bruno CHENUÉL – Professeur Christian BEYAERT

3^{ème} sous-section : *(Biologie Cellulaire)*

Professeur Ali DALLLOUL

4^{ème} sous-section : *(Nutrition)*

Professeur Olivier ZIEGLER – Professeur Didier QUILLIOT - Professeur Rosa-Maria RODRIGUEZ-GUEANT

45^{ème} Section : MICROBIOLOGIE, MALADIES TRANSMISSIBLES ET HYGIÈNE

1^{ère} sous-section : *(Bactériologie – virologie ; hygiène hospitalière)*

Professeur Alain LE FAOU - Professeur Alain LOZNIEWSKI – Professeur Evelyne SCHVOERER

3^{ème} sous-section : *(Maladies infectieuses ; maladies tropicales)*

Professeur Thierry MAY – Professeur Christian RABAUD

46^{ème} Section : SANTÉ PUBLIQUE, ENVIRONNEMENT ET SOCIÉTÉ

1^{ère} sous-section : *(Épidémiologie, économie de la santé et prévention)*

Professeur Philippe HARTEMANN – Professeur Serge BRIANÇON - Professeur Francis GUILLEMIN

Professeur Denis ZMIROU-NAVIER – Professeur François ALLA

2^{ème} sous-section : *(Médecine et santé au travail)*

Professeur Christophe PARIS

3^{ème} sous-section : *(Médecine légale et droit de la santé)*

Professeur Henry COUDANE

4^{ème} sous-section : *(Biostatistiques, informatique médicale et technologies de communication)*

Professeur François KOHLER – Professeur Éliane ALBUISSON

47^{ème} Section : CANCÉROLOGIE, GÉNÉTIQUE, HÉMATOLOGIE, IMMUNOLOGIE

1^{ère} sous-section : *(Hématologie ; transfusion)*

Professeur Pierre BORDIGONI - Professeur Pierre FEUGIER

2^{ème} sous-section : *(Cancérologie ; radiothérapie)*

Professeur François GUILLEMIN – Professeur Thierry CONROY

Professeur Didier PEIFFERT – Professeur Frédéric MARCHAL

3^{ème} sous-section : *(Immunologie)*

Professeur Gilbert FAURE – Professeur Marie-Christine BENE

4^{ème} sous-section : *(Génétique)*

Professeur Philippe JONVEAUX – Professeur Bruno LEHEUP

48^{ème} Section : ANESTHÉSIOLOGIE, RÉANIMATION, MÉDECINE D'URGENCE, PHARMACOLOGIE ET THÉRAPEUTIQUE

1^{ère} sous-section : *(Anesthésiologie - réanimation ; médecine d'urgence)*

Professeur Claude MEISTELMAN – Professeur Hervé BOUAZIZ

Professeur Gérard AUDIBERT – Professeur Thomas FUCHS-BUDER – Professeur Marie-Reine LOSSER

2^{ème} sous-section : *(Réanimation ; médecine d'urgence)*

Professeur Alain GERARD - Professeur Pierre-Édouard BOLLAERT

Professeur Bruno LÉVY – Professeur Sébastien GIBOT

3^{ème} sous-section : *(Pharmacologie fondamentale ; pharmacologie clinique ; addictologie)*

Professeur Patrick NETTER – Professeur Pierre GILLET

4^{ème} sous-section : *(Thérapeutique ; médecine d'urgence ; addictologie)*

Professeur François PAILLE – Professeur Faiez ZANNAD - Professeur Patrick ROSSIGNOL

49^{ème} Section : PATHOLOGIE NERVEUSE ET MUSCULAIRE, PATHOLOGIE MENTALE, HANDICAP ET RÉÉDUCATION

1^{ère} sous-section : (Neurologie)

Professeur Hervé VESPIGNANI - Professeur Xavier DUCROCQ – Professeur Marc DEBOUVERIE
Professeur Luc TAILLANDIER – Professeur Louis MAILLARD

2^{ème} sous-section : (Neurochirurgie)

Professeur Jean-Claude MARCHAL – Professeur Jean AUQUE – Professeur Olivier KLEIN
Professeur Thierry CIVIT – Professeur Sophie COLNAT-COULBOIS

3^{ème} sous-section : (Psychiatrie d'adultes ; addictologie)

Professeur Jean-Pierre KAHN – Professeur Raymund SCHWAN

4^{ème} sous-section : (Pédopsychiatrie ; addictologie)

Professeur Daniel SIBERTIN-BLANC – Professeur Bernard KABUTH

5^{ème} sous-section : (Médecine physique et de réadaptation)

Professeur Jean PAYSANT

50^{ème} Section : PATHOLOGIE OSTÉO-ARTICULAIRE, DERMATOLOGIE et CHIRURGIE PLASTIQUE

1^{ère} sous-section : (Rhumatologie)

Professeur Isabelle CHARY-VALCKENAERE – Professeur Damien LOEUILLE

2^{ème} sous-section : (Chirurgie orthopédique et traumatologique)

Professeur Daniel MOLE - Professeur Didier MAINARD
Professeur François SIRVEAUX – Professeur Laurent GALOIS

3^{ème} sous-section : (Dermato-vénéréologie)

Professeur Jean-Luc SCHMUTZ – Professeur Annick BARBAUD

4^{ème} sous-section : (Chirurgie plastique, reconstructrice et esthétique ; brûlologie)

Professeur François DAP – Professeur Gilles DAUTEL

51^{ème} Section : PATHOLOGIE CARDIO-RESPIRATOIRE et VASCULAIRE

1^{ère} sous-section : (Pneumologie ; addictologie)

Professeur Yves MARTINET – Professeur Jean-François CHABOT – Professeur Ari CHAOUAT

2^{ème} sous-section : (Cardiologie)

Professeur Etienne ALIOT – Professeur Yves JUILLIERE – Professeur Nicolas SADOUL
Professeur Christian de CHILLOU

3^{ème} sous-section : (Chirurgie thoracique et cardiovasculaire)

Professeur Jean-Pierre VILLEMOT – Professeur Thierry FOLLIGUET

4^{ème} sous-section : (Chirurgie vasculaire ; médecine vasculaire)

Professeur Denis WAHL – Professeur Sergueï MALIKOV

52^{ème} Section : MALADIES DES APPAREILS DIGESTIF et URINAIRE

1^{ère} sous-section : (Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie)

Professeur Marc-André BIGARD - Professeur Jean-Pierre BRONOWICKI – Professeur Laurent PEYRIN-BIROULET

3^{ème} sous-section : (Néphrologie)

Professeur Dominique HESTIN – Professeur Luc FRIMAT

4^{ème} sous-section : (Urologie)

Professeur Jacques HUBERT – Professeur Pascal ESCHWEGE

53^{ème} Section : MÉDECINE INTERNE, GÉRIATRIE et CHIRURGIE GÉNÉRALE

1^{ère} sous-section : (Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement ; médecine générale ; addictologie)

Professeur Jean-Dominique DE KORWIN – Professeur Pierre KAMINSKY

Professeur Athanase BENETOS - Professeur Gisèle KANNY – Professeur Christine PERRET-GUILLAUME

2^{ème} sous-section : (Chirurgie générale)

Professeur Laurent BRESLER - Professeur Laurent BRUNAUD – Professeur Ahmet AYAV

54^{ème} Section : DÉVELOPPEMENT ET PATHOLOGIE DE L'ENFANT, GYNÉCOLOGIE-OBSTÉTRIQUE, ENDOCRINOLOGIE ET REPRODUCTION

1^{ère} sous-section : (Pédiatrie)

Professeur Jean-Michel HASCOET - Professeur Pascal CHASTAGNER

Professeur François FEILLET - Professeur Cyril SCHWEITZER – Professeur Emmanuel RAFFO

2^{ème} sous-section : (Chirurgie infantile)

Professeur Pierre JOURNEAU – Professeur Jean-Louis LEMELLE

3^{ème} sous-section : (Gynécologie-obstétrique ; gynécologie médicale)

Professeur Jean-Louis BOUTROY - Professeur Philippe JUDLIN

4^{ème} sous-section : (Endocrinologie, diabète et maladies métaboliques ; gynécologie médicale)

Professeur Georges WERYHA – Professeur Marc KLEIN – Professeur Bruno GUERCI

55^{ème} Section : PATHOLOGIE DE LA TÊTE ET DU COU

1^{ère} sous-section : (*Oto-rhino-laryngologie*)

Professeur Roger JANKOWSKI – Professeur Cécile PARIETTI-WINKLER

2^{ème} sous-section : (*Ophthalmologie*)

Professeur Jean-Luc GEORGE – Professeur Jean-Paul BERROD – Professeur Karine ANGIOI

3^{ème} sous-section : (*Chirurgie maxillo-faciale et stomatologie*)

Professeur Jean-François CHASSAGNE – Professeur Etienne SIMON – Professeur Muriel BRIX

PROFESSEURS DES UNIVERSITÉS

61^{ème} Section : GÉNIE INFORMATIQUE, AUTOMATIQUE ET TRAITEMENT DU SIGNAL

Professeur Walter BLONDEL

64^{ème} Section : BIOCHIMIE ET BIOLOGIE MOLÉCULAIRE

Professeur Sandrine BOSCHI-MULLER

PROFESSEURS DES UNIVERSITÉS DE MÉDECINE GÉNÉRALE

Professeur Jean-Marc BOIVIN

=====

PROFESSEUR ASSOCIÉ

Médecine Générale

Professeur associé Paolo DI PATRIZIO

=====

MAÎTRES DE CONFÉRENCES DES UNIVERSITÉS - PRATICIENS HOSPITALIERS

42^{ème} Section : MORPHOLOGIE ET MORPHOGENÈSE

1^{ère} sous-section : (*Anatomie*)

Docteur Bruno GRIGNON – Docteur Thierry HAUMONT – Docteur Manuela PEREZ

2^{ème} sous-section : (*Cytologie et histologie*)

Docteur Edouard BARRAT - Docteur Françoise TOUATI – Docteur Chantal KOHLER

3^{ème} sous-section : (*Anatomie et cytologie pathologiques*)

Docteur Aude BRESSENOT

43^{ème} Section : BIOPHYSIQUE ET IMAGERIE MÉDICALE

1^{ère} sous-section : (*Biophysique et médecine nucléaire*)

Docteur Jean-Claude MAYER - Docteur Jean-Marie ESCANYE

2^{ème} sous-section : (*Radiologie et imagerie médicale*)

Docteur Damien MANDRY

44^{ème} Section : BIOCHIMIE, BIOLOGIE CELLULAIRE ET MOLÉCULAIRE, PHYSIOLOGIE ET NUTRITION

1^{ère} sous-section : (*Biochimie et biologie moléculaire*)

Docteur Sophie FREMONT - Docteur Isabelle GASTIN – Docteur Marc MERTEN

Docteur Catherine MALAPLATE-ARMAND - Docteur Shyue-Fang BATTAGLIA

2^{ème} sous-section : (*Physiologie*)

Docteur Mathias POUSSEL – Docteur Silvia VARECHOVA

3^{ème} sous-section : (*Biologie Cellulaire*)

Docteur Véronique DECOT-MAILLERET

45^{ème} Section : MICROBIOLOGIE, MALADIES TRANSMISSIBLES ET HYGIÈNE

1^{ère} sous-section : (*Bactériologie – Virologie ; hygiène hospitalière*)

Docteur Véronique VENARD – Docteur Hélène JEULIN – Docteur Corentine ALAUZET

2^{ème} sous-section : (*Parasitologie et mycologie*)

Madame Marie MACHOUART

46^{ème} Section : SANTÉ PUBLIQUE, ENVIRONNEMENT ET SOCIÉTÉ
1^{ère} sous-section : (*Epidémiologie, économie de la santé et prévention*)
 Docteur Alexis HAUTEMANIÈRE – Docteur Frédérique CLAUDOT – Docteur Cédric BAUMANN
2^{ème} sous-section (*Médecine et Santé au Travail*)
 Docteur Isabelle THAON
3^{ème} sous-section (*Médecine légale et droit de la santé*)
 Docteur Laurent MARTRILLE
4^{ème} sous-section : (*Biostatistiques, informatique médicale et technologies de communication*)
 Docteur Nicolas JAY

47^{ème} Section : CANCÉROLOGIE, GÉNÉTIQUE, HÉMATOLOGIE, IMMUNOLOGIE
2^{ème} sous-section : (*Cancérologie ; radiothérapie : cancérologie (type mixte : biologique)*)
 Docteur Lina BOLOTINE
3^{ème} sous-section : (*Immunologie*)
 Docteur Marcelo DE CARVALHO BITTENCOURT
4^{ème} sous-section : (*Génétique*)
 Docteur Christophe PHILIPPE – Docteur Céline BONNET

48^{ème} Section : ANESTHÉSIOLOGIE, RÉANIMATION, MÉDECINE D'URGENCE, PHARMACOLOGIE ET THÉRAPEUTIQUE
3^{ème} sous-section : (*Pharmacologie fondamentale ; pharmacologie clinique*)
 Docteur Françoise LAPICQUE – Docteur Marie-José ROYER-MORROT
 Docteur Nicolas GAMBIER – Docteur Julien SCALA-BERTOLA

50^{ème} Section : PATHOLOGIE OSTÉO-ARTICULAIRE, DERMATOLOGIE et CHIRURGIE PLASTIQUE
1^{ère} sous-section : (*Rhumatologie*)
 Docteur Anne-Christine RAT
3^{ème} sous-section : (*Dermato-vénéréologie*)
 Docteur Anne-Claire BURSZTEJN
4^{ème} sous-section : (*Chirurgie plastique, reconstructrice et esthétique ; brûlologie*)
 Docteur Laetitia GOFFINET-PLEUTRET

51^{ème} Section : PATHOLOGIE CARDIO-RESPIRATOIRE ET VASCULAIRE
4^{ème} sous-section : (*Chirurgie vasculaire ; médecine vasculaire*)
 Docteur Stéphane ZUILY

53^{ème} Section : MÉDECINE INTERNE, GÉRIATRIE et CHIRURGIE GÉNÉRALE
1^{ère} sous-section : (*Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement ; médecine générale ; addictologie*)
 Docteur Laure JOLY

54^{ème} Section : DÉVELOPPEMENT ET PATHOLOGIE DE L'ENFANT, GYNÉCOLOGIE-OBSTÉTRIQUE, ENDOCRINOLOGIE ET REPRODUCTION
3^{ème} sous-section :
 Docteur Olivier MOREL
5^{ème} sous-section : (*Biologie et médecine du développement et de la reproduction ; gynécologie médicale*)
 Docteur Jean-Louis CORDONNIER

=====

MAÎTRE DE CONFÉRENCE DES UNIVERSITÉS DE MÉDECINE GÉNÉRALE

Docteur Elisabeth STEYER

=====

MAÎTRES DE CONFÉRENCES

5^{ème} section : SCIENCE ÉCONOMIE GÉNÉRALE
 Monsieur Vincent LHUILLIER

19^{ème} section : SOCIOLOGIE, DÉMOGRAPHIE
Madame Joëlle KIVITS

40^{ème} section : SCIENCES DU MÉDICAMENT
Monsieur Jean-François COLLIN

60^{ème} section : MÉCANIQUE, GÉNIE MÉCANIQUE ET GÉNIE CIVILE
Monsieur Alain DURAND

61^{ème} section : GÉNIE INFORMATIQUE, AUTOMATIQUE ET TRAITEMENT DU SIGNAL
Monsieur Jean REBSTOCK

64^{ème} section : BIOCHIMIE ET BIOLOGIE MOLÉCULAIRE
Mademoiselle Marie-Claire LANHERS – Monsieur Pascal REBOUL – Mr Nick RAMALANJAONA

65^{ème} section : BIOLOGIE CELLULAIRE
Mademoiselle Françoise DREYFUSS – Monsieur Jean-Louis GELLY
Madame Ketsia HESS – Monsieur Hervé MEMBRE – Monsieur Christophe NEMOS – Madame Natalia DE ISLA
Madame Nathalie MERCIER – Madame Céline HUSELSTEIN

66^{ème} section : PHYSIOLOGIE
Monsieur Nguyen TRAN

MAÎTRES DE CONFÉRENCES ASSOCIÉS

Médecine Générale
Docteur Sophie SIEGRIST
Docteur Arnaud MASSON
Docteur Pascal BOUCHE

=====

PROFESSEURS ÉMÉRITES

Professeur Jean-Marie ANDRÉ - Professeur Daniel ANTHOINE - Professeur Gérard BARROCHE
Professeur Pierre BEY - Professeur Patrick BOISSEL - Professeur Michel BOULANGÉ
Professeur Jean-Pierre CRANCE - Professeur Jean-Pierre DELAGOUTTE - Professeur Jean-Marie GILGENKRANTZ
Professeur Simone GILGENKRANTZ - Professeur Michèle KESSLER - Professeur Henri LAMBERT
Professeur Denise MONERET-VAUTRIN - Professeur Pierre MONIN - Professeur Jean-Pierre NICOLAS
Professeur Luc PICARD - Professeur Michel PIERSON - Professeur Jacques POUREL
Professeur Jean-François STOLTZ - Professeur Michel STRICKER - Professeur Gilbert THIBAUT
Professeur Hubert UFFHOLTZ - Professeur Paul VERT
Professeur Colette VIDAILHET - Professeur Michel VIDAILHET

DOCTEURS HONORIS CAUSA

Professeur Norman SHUMWAY (1972)
Université de Stanford, Californie (U.S.A)
Professeur Paul MICHIELSEN (1979)
Université Catholique, Louvain (Belgique)
Professeur Charles A. BERRY (1982)
Centre de Médecine Préventive, Houston (U.S.A)

Harry J. BUNCKE (1989)
Université de Californie, San Francisco (U.S.A)
Professeur Daniel G. BICHET (2001)
Université de Montréal (Canada)
Professeur Brian BURCHELL (2007)
Université de Dundee (Royaume Uni)

Professeur Ralph GRÄSBECK (1996)
Université d'Helsinki (FINLANDE)
Professeur James STEICHEN (1997)
Université d'Indianapolis (U.S.A)
Professeur Duong Quang TRUNG (1997)
*Centre Universitaire de Formation et de
Perfectionnement des Professionnels de Santé d'Hô
Chi Minh-Ville (VIETNAM)*
Professeur Marc LEVENSTON (2005)
Institute of Technology, Atlanta (USA)
Professeur David ALPERS (2011)
Université de Washington (USA)
Professeur Yunfeng ZHOU (2009)
Université de WUHAN (CHINE)

Professeur Pierre-Marie GALETTI (1982)
Brown University, Providence (U.S.A)
Professeur Marnish Nisbet MUNRO (1982)
Massachusetts Institute of Technology (U.S.A)

Professeur Théodore H. SCHIEBLER (1989)
Institut d'Anatomie de Würzburg (R.F.A)
Professeur Maria DELIVORIA-PAPADOPOULOS
(1996)
Université de Pennsylvanie (U.S.A)

Professeur Mashaki KASHIWARA (1996)
*Research Institute for Mathematical Sciences de Kyoto
(JAPON)*

Professeur Mildred T. STAHLMAN (1982)
Vanderbilt University, Nashville (U.S.A)

SERMENT

"Au moment d'être admis à exercer la médecine, je promets et je jure d'être fidèle aux lois de l'honneur et de la probité. Mon premier souci sera de rétablir, de préserver ou de promouvoir la santé dans tous ses éléments, physiques et mentaux, individuels et sociaux. Je respecterai toutes les personnes, leur autonomie et leur volonté, sans aucune discrimination selon leur état ou leurs convictions. J'interviendrai pour les protéger si elles sont affaiblies, vulnérables ou menacées dans leur intégrité ou leur dignité. Même sous la contrainte, je ne ferai pas usage de mes connaissances contre les lois de l'humanité. J'informerai les patients des décisions envisagées, de leurs raisons et de leurs conséquences. Je ne tromperai jamais leur confiance et n'exploiterai pas le pouvoir hérité des circonstances pour forcer les consciences. Je donnerai mes soins à l'indigent et à quiconque me les demandera. Je ne me laisserai pas influencer par la soif du gain ou la recherche de la gloire.

Admis dans l'intimité des personnes, je tairai les secrets qui me sont confiés. Reçu à l'intérieur des maisons, je respecterai les secrets des foyers et ma conduite ne servira pas à corrompre les mœurs. Je ferai tout pour soulager les souffrances. Je ne prolongerai pas abusivement les agonies. Je ne provoquerai jamais la mort délibérément.

Je préserverai l'indépendance nécessaire à l'accomplissement de ma mission. Je n'entreprendrai rien qui dépasse mes compétences. Je les entretiendrai et les perfectionnerai pour assurer au mieux les services qui me seront demandés.

J'apporterai mon aide à mes confrères ainsi qu'à leurs familles dans l'adversité.

Que les hommes et mes confrères m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses ; que je sois déshonoré et méprisé si j'y manque".

A NOTRE MAITRE ET PRESIDENT DE THESE,

Monsieur le Professeur Roger JANKOWSKI
Professeur d'Oto-Rhino-Laryngologie

Vous me faites l'honneur de juger et de présider cette thèse. Je vous remercie pour votre accueil dans votre service, au sein d'une équipe compétente, dynamique et bienveillante. Merci pour la confiance que vous avez su m'accorder tout au long de l'internat pour que je puisse avancer, guidé par votre savoir médical et vos qualités humaines. Je vous suis également reconnaissant de m'avoir fait partager tout au long de ces années votre grande expérience professionnelle.

Pour toutes ces raisons, soyez assuré, Professeur JANKOWSKI, de mon estime et de ma reconnaissance.

A NOTRE MAITRE ET JUGE,

Madame le Professeur Cécile PARIETTI-WINKLER
Professeur d'Oto-Rhino-Laryngologie

Je vous remercie de m'avoir confié ce travail et de m'avoir guidé lors de sa réalisation. Votre patience à mon égard lors de vos enseignements pratiques et théoriques m'a permis de mener à bien cette étude.

Pour toutes ces raisons, soyez assurée, Professeur PARIETTI-WINKLER, de mon estime et de ma reconnaissance.

A NOTRE MAITRE ET JUGE,

Monsieur le Professeur André CHAYS
Professeur d'Oto-Rhino-Laryngologie

Vous me faites l'honneur d'accepter de faire partie de mon jury et d'évaluer cette thèse. Votre expérience clinique ainsi que vos connaissances scientifiques m'ont été profitables dans la réalisation de ce travail.

Pour toutes ces raisons, soyez assuré, Professeur André CHAYS, de mon estime et de ma reconnaissance.

A NOTRE JUGE,

Madame le Docteur Bétina MONTAUT-VERIENT
Audiophonologiste

Apprendre de vos connaissances et de votre expérience est un réel plaisir.

J'ai été touché par votre sympathie et votre disponibilité. Vous m'avez fait découvrir l'audiophonologie, domaine si important pour chaque ORL.

Pour toutes ces raisons, soyez assurée Docteur MONTAUT-VERIENT, de mon estime et de ma reconnaissance.

A NOTRE JUGE,

Monsieur le Docteur Gérome GAUCHARD

Je vous remercie pour votre aide précieuse sans laquelle il ne m'aurait pas été possible d'élaborer ce travail. Vos explications et votre esprit scientifique m'ont permis de m'enrichir.

Pour toutes ces raisons, soyez assuré Docteur GAUCHARD, de mon estime et de ma reconnaissance.

Remerciements particuliers

A mon beau-père, homme passionné par la vie

Au Professeur Claude Simon, votre dextérité chirurgicale, votre enseignement et votre humour si caustique font de vous un être exceptionnel

Au docteur Montinet, qui m'a transmis sa passion

Au docteur Toussaint, vous m'avez guidé dans les décisions diagnostiques, thérapeutiques et mes gestes opératoires. Vous m'avez rappelé que derrière une pathologie, il y a un patient, un contexte, son entourage. Pour tout cela, je souhaite que l'ASNL remporte un jour la ligue 1 (même si ce n'est pas pour cette année...désolé)

Au docteur Stringini merci de m'accueillir dans votre nouveau service

A Firas, mon premier assistant qui m'a inculqué les bases de l'ORL et son regard fourbe

A Patrice et son obsession de me contredire (peut-être à juste titre...)

A Clémence... pour tes chaussures

A Nicolas, pour ton ouverture d'esprit sur notre discipline « même si tout a déjà été réalisé »

A Trung... j'attends toujours tes nems

A Pablo (chirurgien cardiaque), pour qui « un chien reste un chien... »

Au docteur Koch qui guide chaque interne dans ses premiers pas tremblant (et j'en sais quelque chose...) au bloc opératoire

A tous mes co-internes : Cécile (enfin tu finis ton internat), Hélène (princesse de l'arque Buse), Adrien (ça plane pour nous), Marylisa (merci d'avoir bien géré le secteur 2 ce

semestre), Claire (bip grave...bip aigu...), Sophie, Sébastien (on boira du lait quand les vaches mangeront des raisins), Hervé...

A tout le service d'ORL, généreux, compétent et merci aux infirmières de m'avoir préparé tous les matins une tasse de café

Au docteur Taron, docteur Marchand et docteur Bertrand

A mes amis, ma deuxième famille, votre présence durant ces années m'est si précieuse

A Bassel (et sa famille) pour qui la sobriété est une hallucination du au manque d'alcool

A Marty (et claire), guide spirituel et spiritueux

A ma Vérole pour qui le rire est le meilleur désinfectant du foie

A Anne, sa délicieuse femme

A Ben (et Jamila) qui a l'art de la réplique, l'esprit d'à propos, le tac au tac...ce fameux talent de la répartie

A olivier (et sa famille), droit au but ma poule

A Fanette pour ton flegme (en tout cas avec moi)

A Manu (et Sarah) garde cette sympathie et cette joie de vivre

A Greg véritable phénix, et aussi beau que cet oiseau légendaire

A Julien (Caroline et la meilleure amie d'Alice, Apolline), alchimie entre la sagesse et la folie

A Thibault (et sa famille) pour toutes nos soirées

A Alex, valeur ajoutée de notre groupe d'amis

A Matthieu, nous sommes devenus amis en une soirée (certes bien arrosée), tes qualités, ton soutien auprès de moi et de ma famille font de toi le digne parrain d'Alice

A ma mère, je te dois tellement, mon éducation, mon parcours scolaire. Tu es un modèle pour moi afin d'être un bon père de famille. Tu peux être fière de moi comme je suis fier de toi

A mon frère Thierry et à ma sœur Nathalie (et Patrice) pour leur présence à mes côtés et leur soutien

A Mady, Gilbert, Lorianne, Pierre et Nono... et le futur cousin ou cousine d'Alice... Noël va être très agréable

A mon Père et Marylène

A ma belle famille pour leur soutien et surtout à ma formidable belle-mère qui fait tant pour sa famille

A ma femme, Van-mai, saches que dans mon carquois j'ai encore de nombreuses flèches... pour poursuivre l'œuvre de notre vie. Notre folie guide notre amour

A Alice, mon amour

TABLE DES MATIERES

Introduction	17
I- Le rôle de la fonction d'équilibration	17
II- Trois niveaux de régulation	19
1- système afférent	19
2- Système intégratif central	21
3- Système effecteur moteur	22
III- Fonction d'équilibration et oreille interne	23
1- Capteur vestibulaire	23
2- Fonction auditive : rôle d'orientation	24
II- Implant cochléaire	25
1- Définition générale et historique	25
2- Composants principaux de l'implant cochléaire	27
3- Principe de fonctionnement	29
4- Indications	29
5- Mis en place chirurgicale	31
6- Anomalie posturale après implantation cochléaire et problématique de l'étude	34
Matériel et méthode	35
Résultats	41
Discussion	43
Conclusion	45
Bibliographie	46
Annexes	52
Tableau 1. Test d'organisation sensoriel	52
Tableau 2. Âge et caractéristiques anthropométriques	53
Tableau 3. Résultats de l'évaluation vestibulaire avant (J0) et après chirurgie (J360)	54
Tableau 4. Test d'organisation sensoriel (SOT): Résultats médians	55
Annexe 4 : Article soumis	56

Introduction :

I- Rôle de la fonction d'équilibration

La posture est l'attitude fondamentale d'une espèce : quadrupédie chez la plupart des mammifères, station bipède ou érigée chez les primates supérieurs et l'homme. Cette posture est éminemment instable du fait des accélérations auxquelles l'homme est soumis : accélération gravitaire, accélérations imposées par le mouvement lui-même. L'équilibration est l'aptitude au maintien d'une posture en dépit de circonstances contraires. C'est donc le résultat de l'action de l'ensemble des mécanismes qui visent à la conservation de la posture en dépit des causes qui tendent à la perturber lors de la station debout (équilibration statique) et lors de la déambulation ou de la gestuelle (équilibration dynamique) (Pélissier J, 1993). La posture doit répondre à deux impératifs en apparence contradictoires : permettre le mouvement d'un segment tout en stabilisant les autres segments pour assurer le maintien de la station érigée chez l'homme (J.Massion, 1992). La fonction d'équilibration doit prévoir et réguler un ensemble de commandes parallèles destinées à anticiper les déséquilibres posturaux qui accompagnent inéluctablement la réalisation du mouvement et à corriger les effets perturbateurs du mouvement sur la posture. Il y a donc une coordination posture-mouvement. La fonction d'équilibration est une fonction sensori-motrice plurimodale complexe qui ne peut s'exercer que grâce à la coexistence de différents systèmes (système sensoriel, de contrôle et effecteur) assurant une posture appropriée en toutes circonstances, et notamment la posture de repos, spécifique de chaque espèce animale et si particulière chez les bipèdes humains. Le maintien de la posture, beaucoup plus instable que celle des quadrupèdes fait intervenir des mécanismes complexes contrôlés par le système nerveux central et implique un système de régulation tonique postural (Massion et Woollacott, 1996). Pour ce faire, la fonction d'équilibration est régulée par trois systèmes que nous allons détailler.

II- Trois niveaux de régulation de la fonction d'équilibration

La fonction d'équilibration est une fonction sensori-motrice plurimodale assurant en permanence la stabilité du sujet. Différentes entrées sensorielles interviennent dans la perception et la régulation du maintien de l'équilibre, parmi lesquelles la proprioception, l'extéroception plantaire, les informations vestibulaires et les informations visuelles. Toutes ces afférences sensorielles convergent vers les noyaux vestibulaires du tronc cérébral, correspondant au système intégratif central. Elles vont être comparées entre elles, mais aussi au vécu antérieur du sujet, de manière à élaborer une réponse motrice effectrice, visant à stabiliser d'une part le regard et d'autre part la posture (Perrin et Lestienne, 1994).

1- Système afférent

La fonction d'équilibration est tributaire de l'intégration d'informations obtenues par différentes entrées sensorielles spécifiques :

- Les informations proprioceptives relatives aux mouvements des articulations, aux déformations des tissus musculaires et cutanés, jouent un rôle important dans le maintien de l'équilibre (Roll et Roll, 1987). Ces afférences sensorielles proviennent de trois types de récepteurs : les récepteurs fusoriaux, les récepteurs tendineux de Golgi et les récepteurs articulaires. Dispersés à l'intérieur du muscle, les récepteurs fusoriaux participent de façon prépondérante au maintien de l'activité tonique des motoneurones par la voie réflexe dite myotatique. Ces récepteurs sont sollicités en grande partie par l'étirement des muscles antigravitaires. Les récepteurs tendineux de Golgi, situés à l'extrémité de la fibre musculaire, sont sensibles à une tension exercée soit par l'étirement passif de la fibre musculaire, soit par l'activation des fibres musculaires. Les récepteurs articulaires appelés corpuscule sont situés au niveau des articulations dans la capsule articulaire. Ils sont sensibles aux mouvements de l'articulation. Différents types de corpuscules, à l'intérieur de la capsule articulaire peuvent

être différenciés dont principalement les corpuscules de Ruffini et de Pacini. Les plus importants sont les corpuscules de Ruffini qui sont sensibles à la position des pièces articulaires (sensibilité statique) et à la rotation de l'articulation (sensibilité dynamique) (Perrin et Lestienne, 1994).

- L'extéroception plantaire représente les récepteurs tactiles. Un réflexe d'afférences podales a été décrit, indiquant la nécessité d'une stimulation plantaire pour le maintien et l'harmonie du tonus antigravitaire, composé chez l'homme des muscles extenseurs des membres inférieurs et de la colonne vertébrale (Massion, 1994). La plante du pied est le lien entre l'individu et son support naturel, le sol. La densité élevée de récepteur sur la zone d'appui (Dubois et Levame, 1966), permet d'envisager la plante du pied comme une plate-forme chargée d'analyser les variations de pression à la base du corps humain (Enjalbert *et al.*, 1993). De nombreuses études ont montré le rôle de l'extéroception plantaire dans le processus d'équilibration (Diener *et al.*, 1984; Magnusson *et al.*, 1990). Cette information tactile a un rôle très important dans le contrôle de l'équilibre et peut devenir prépondérante dans les situations de défaillance ou de conflit par rapport aux autres sources d'informations, visuelles et vestibulaires essentiellement (Perrin et Lestienne, 1994).

- Les informations vestibulaires proviennent de l'appareil vestibulaire, structure intervenant principalement dans le contrôle de la fonction d'équilibration, qui est située dans l'oreille interne. Celle-ci comprend d'une part le labyrinthe osseux composé de cavités osseuses en communication les unes avec les autres et d'autre part le labyrinthe membraneux composé de cavités à parois membraneuses contenues dans le labyrinthe osseux. Du labyrinthe membraneux naissent les voies nerveuses acoustiques et vestibulaires. Ses cavités sont remplies d'endolymphe. L'espace existant entre le labyrinthe membraneux et osseux est rempli de périlymphe. L'appareil vestibulaire est pair et symétrique ; il est affecté à la

détection et à la mesure des accélérations linéaires et angulaires. L'orientation du regard leur est asservie, particularité qui constitue le fondement de l'origine du nystagmus.

- les informations visuelles ont un rôle prépondérant dans la régulation posturale (Dichgans *et al.*, 1978) puisqu'elles permettent de percevoir la position des différentes parties du corps entres elles et avec l'environnement (Isableu *et al.*, 1997). Le système visuel a une double fonction : fonction extéroceptive de la vision centrale ou fovéale, qui permet l'identification (forme, dimension) et la localisation précise (distance) d'un objet ; fonction proprioceptive de la vision périphérique, qui renseigne sur les mouvements de l'environnement. Cette proprioception intervient de façon prédominante sur le contrôle postural et le maintien de l'équilibre.

Ce système sensoriel fournit au sujet des informations sur son environnement et sa situation par rapport à celui-ci, qu'il soit fixe ou mobile.

2- Système intégratif central

Le tronc cérébral, comportant les noyaux vestibulaires, intègre de manière continue des informations provenant de capteurs sensoriels (proprioception, extéroception plantaire, vestibulaire, et visuel). Les signaux émis par le labyrinthe membraneux empruntent la branche vestibulaire de la huitième paire crânienne pour gagner les centres du tronc cérébral et du cervelet qui opèrent une grande partie des traitements nécessaires pour déterminer la position et les déplacements de la tête. Les noyaux vestibulaires droits et gauches sont interconnectés (Sauvage *et al.*, 1992). Ces connexions auraient une fonction inhibitrice sur les neurones vestibulaires contralatéraux, ce qui empêcherait l'indépendance de chaque membre mis en jeu dans les activités locomotrices (Perrin & Lestienne, 1994). Les projections centrales du système vestibulaires intervenant dans l'équilibration participent à 3 réflexes servant : à maintenir l'équilibre du corps et du regard pendant les mouvements, à maintenir la posture et

à maintenir le tonus musculaire. Parmi ceux-ci, le réflexe vestibulo-oculaire (RVO), provenant des connexions vestibulo-oculaire entre les noyaux vestibulaires et les noyaux des nerfs crâniens impliqués dans l'oculomotricité, qui a pour fonction d'induire des mouvements oculaires (réflexe optocinétique) qui contrebalancent les mouvements de la tête et permettent ainsi de garder le regard fixé sur un point particulier (Perrin & Lestienne, 1994). Le réflexe vestibulo-cervical (RVC) et le réflexe vestibulo-spinal (RVS) résultent des connexions entre les noyaux vestibulaires et la moelle épinière. Le système vestibulaire contribue ainsi, par le RVC aux ajustements posturaux de la tête et par le RVS aux ajustements du tronc en innervant les muscles extenseurs du tronc et des membres. Ainsi, se trouvent assurés l'équilibration et le maintien de la posture érigée. Le contrôle cérébelleux est capable de moduler le jeu des muscles agonistes et antagonistes permettant de réguler l'amplitude et la vitesse du mouvement et/ou d'assurer la coordination temporelle des activités musculaires (Perrin et Lestienne, 1994). Le cervelet est principalement impliqué dans la mise en place de nouvelles combinaisons musculaires lors de la création d'un geste (Massion, 1992) et assure par l'intermédiaire des trois parties qui le composent (archécervelet, palécervelet et neocervelet) la régulation des activités musculaires du mouvement volontaire global, des activités musculaires toniques de la posture et des activités musculaires toniques du maintien de l'équilibre.

3- Système effecteur moteur

Les aires motrices corticales sont à l'origine du faisceau pyramidal dont le rôle fonctionnel essentiel est le contrôle moteur. L'acte moteur apparaît comme particulièrement complexe ; le système nerveux central doit assurer la commande principale qui évoluera en fonction du vécu de l'individu. Au niveau du tronc cérébral, les excitations réflexogènes par stimulations labyrinthiques, proprioceptives et visuelles entraînent des réactions motrices, dont les réactions d'équilibration.

III- Fonction d'équilibration et oreille interne

1- Capteur vestibulaire

Les capteurs vestibulaires sont localisés à l'intérieur de l'organe membraneux, lui-même englobé dans le labyrinthe osseux du rocher. A chaque groupe de capteurs sont connectées des fibres nerveuses qui constituent les nerfs vestibulaires, supérieur et inférieur et qui acheminent les informations vers le système nerveux central. Le labyrinthe membraneux contient les organes sensoriels proprement dits. Ils sont au nombre de cinq : trois capteurs dits ampullaires sensibles aux accélérations angulaires et situés au niveau des ampoules des trois canaux semi-circulaires ; et deux capteurs dits maculaires, sensibles aux accélérations linéaires et situés au niveau du vestibule.

Canaux semi-circulaires : capteurs d'accélération angulaires

Les ampoules sont formées des extrémités dilatées des trois canaux semi-circulaires membraneux où se situe le capteur proprement dit. A ce niveau existe une sorte de bourrelet perpendiculaire à l'axe de l'ampoule, la cupule (matrice filamenteuse constituée de mucopolysaccharides). Celle-ci est constituée par un épithélium vestibulaire hautement différencié en cellules ciliées sensorielles et en cellules de soutien formant la crête ampullaire. Cette crête baigne dans l'endolymphe. Sur chaque crête ampullaire, les cils sont orientés de la même façon (Sans, 1990). Ces cellules sensorielles sont sensibles aux accélérations angulaires, qui provoquent un déplacement inertiel de la cupule. La transformation de cette accélération est suivie d'une transformation mécanoneurale de la déformation ciliaire et génère un message nerveux le long du nerf ampullaire et renseignant sur la position de la tête (Perrin *et al.*, 1987; Collard, 1994). Les canaux semicirculaires se comportent donc comme des accéléromètres angulaires (Sauvage *et al.*, 1992).

Utricule et saccule : capteur d'accélération linéaire

Le complexe utriculo-sacculaire est formé de deux vésicules qui contiennent chacune une macule renfermant les cellules réceptrices. La macule utriculaire est orientée horizontalement alors que la macule sacculaire est orientée verticalement, orthogonalement à la première. L'utricule et le saccule ont pour rôle de signaler au cerveau tout mouvement linéaire de la tête. L'utricule est le récepteur des accélérations rectilignes verticales. Le saccule est le récepteur des accélérations rectilignes horizontales. L'utricule contient des cellules ciliées dans un plan horizontal. Lors d'une accélération rectiligne verticale, l'otolithe (dont le rôle est analogue à celui de la cupule) appuie sur ces cellules ciliées, ce qui déclenche un potentiel d'action (PA) au niveau du faisceau du nerf vestibulaire qui innerve la macule de l'utricule. Le saccule contient des cellules ciliées dans un plan vertical. Lors d'une accélération rectiligne horizontale, l'otolithe appuie sur ces cellules ciliées, ce qui déclenche un PA au niveau du faisceau du nerf vestibulaire qui innerve la macule du saccule. Le complexe utriculo-sacculaire se comporte comme des accéléromètres linéaires (Pozzo & Berthoz, 1992, Sauvage *et al.*, 1992).

2- Fonction auditive : rôle d'orientation

Le système vestibulaire périphérique est situé dans la partie profonde de l'os temporal. Il est relié à la partie antérieure du labyrinthe ou cochlée, organe spécifiquement dévolu à l'audition. La cochlée est un capteur de vigilance et d'alerte. La cochlée reçoit des informations acoustiques provenant de l'environnement au travers du conduit auditif externe, du tympan et de la chaîne des osselets. Ces capteurs sonores participent à l'élaboration de la construction mentale du monde environnant (Perrin.C, 1991) et interviennent dans la fonction d'équilibration en termes d'orientation.

II- Implant cochléaire

II-1 Définition générale et historique

L'implant cochléaire est une prothèse auditive électrique implantable. L'histoire de l'implant cochléaire est celle de la contribution des quatre nations, la France, les USA, l'Autriche et l'Australie, qui ont tenu un rôle essentiel dans sa mise au point.

Le premier implant cochléaire fut posé en 1957 à Paris par Charles Eyriès, otologiste et anatomiste parisien, après avoir été conçu et fabriqué par André Djourné, professeur de physique médicale à Paris.

Dès 1961, William House, otologiste de Los Angeles, reprit les travaux d'Eyriès. Il codifia l'intervention en positionnant l'électrode de manière stable, en l'introduisant à travers la fenêtre ronde dans le tube cochléaire. Ce système, qui stimulait l'ensemble des fibres du nerf auditif, ne permettait aucune discrimination de la parole sans lecture labiale. Pour les physiologistes, la stimulation séparée, mais simultanée, de plusieurs contingents de fibres nerveuses cochléaires, chacune véhiculant des sensations sonores de fréquences différentes, était indispensable.

Pourtant, chez l'animal en 1964, B. Simmons a mis en place à San Francisco plusieurs électrodes en des points différents du nerf cochléaire au fond du conduit auditif interne et il a obtenu des réponses différenciées au niveau du colliculus. Plus tard, R. Merzenich démontra chez le macaque que les stimulations de chacune de ces électrodes entraînaient des réponses différenciées dans les formations auditives corticales.

Cependant, chirurgicalement ce positionnement des électrodes était impossible chez l'homme. C'est pourquoi, en 1965, W. House décida de se contenter d'un système mono-électrode, dont il poursuivit d'ailleurs la mise en place jusqu'au delà de 1995.

En 1973 R. Michelson (San Francisco) place le premier implant multiélectrodes chez l'homme: c'est un système à 4 canaux avec 4 paires d'antennes différentes : pour chaque canal, une antenne émettrice et une antenne réceptrice.

En France, en se basant sur les travaux américains et australiens, P.MacLéod et Ch.Chouard en 1973, au laboratoire de recherches ORL du CHU St-Antoine à Paris, démontrent chez plusieurs patients atteints de cophose unilatérale traumatique avec paralysie faciale, que la stimulation électrique de 8 à 12 électrodes placées, isolées les unes des autres, dans différents endroits de la cochlée, fournissent des perceptions de fréquences distinctes différentes. En 1975, l'équipe française met au point le premier implant à 8 canaux et à transmission séquentielle, ne nécessitant ainsi qu'une seule antenne, apportant au sourd une série de fréquences utiles.

Dès le début des années 70, l'équipe de G. Clark, à Melbourne, étudie chez l'animal la tolérance et la mise en place du matériel appelé à être implanté chez l'homme. En 1979, G. Clark implante un système multiélectrode simplifié, n'envoyant que le voisement et le premier formant des voyelles; mais sa commercialisation rapide et sa robustesse en assurent une très rapide diffusion. C'est en grande partie grâce aux travaux de Clark et Tong que le principe de l'implant cochléaire a peu à peu, été admis dans le monde.

L'utilisation chez l'adulte en a été approuvée aux États-Unis par la Food and Drug Administration en 1984 chez l'adulte et en 1990 chez l'enfant.

En 2001, le CHU de Nancy a posé son premier implant cochléaire et est devenu centre de référence de l'implantation cochléaire chez l'adulte et l'enfant en 2009.



Photographie du 1^{er} patient implanté par le Pr Simon janvier 2001 (Journal L'Est Républicain)

II-2 Composants principaux de l'implant cochléaire

L'implant cochléaire se compose actuellement de deux parties individualisées mais qui ne peuvent fonctionner l'une sans l'autre : une partie interne et une partie externe. La partie externe est amovible et peut se présenter sous la forme d'un boîtier (figure 1) ou plus généralement sous la forme d'un contour d'oreille (figure 2) semblable aux prothèses auditives à contour d'oreille. Cette partie externe comporte un microphone (1) qui est posé sur le pavillon de l'oreille et capte les variations de pression sonore. Le microprocesseur (2) les convertit en ondes électriques acheminées jusqu'à l'antenne (3).



Figure 1 : partie externe avec boîtier



Figure 2 : Partie externe avec contour d'oreille

La partie interne est destinée à être implantée chirurgicalement ; elle est composée d'un récepteur stimulateur (1), d'un porte-électrode (2) et d'électrodes (3) (figure 3). Ces composants sont encapsulés dans des matériaux biocompatibles qui sont soit des céramiques soit des silicones. Les porte-électrodes modernes contiennent entre 15 et 22 électrodes de stimulation destinées à être placées dans la rampe tympanique de la cochlée. Le nombre d'électrodes varie entre les fabricants. Les porte-électrodes sont soit droits, soit préformés (ce dernier point permet d'espérer un meilleur contact entre les électrodes et le tissu neural, améliorant ainsi la sélectivité fréquentielle et diminuant la consommation énergétique).



Figure 3 : Partie interne de l'implant

II-3 Principe de fonctionnement

Le principe de l'implant cochléaire est de capter les sons de l'environnement puis de les transformer en signaux électriques qui seront transmis aux fibres nerveuses auditives. Le microphone de la partie externe capte l'information acoustique environnementale. Puis, le processeur vocal code ces informations acoustiques en impulsions électriques. Le processeur vocal est un système électronique qui filtre le signal d'entrée provenant du microphone et le convertit en une série de signaux électriques qui seront délivrés à la partie interne implantable de l'implant cochléaire. Le codage électronique concerne les fréquences, le temps et l'intensité. Le processeur vocal contient des unités de contrôle pour le volume et la sensibilité. L'antenne émettrice permet la transmission transcutanée des impulsions électriques vers le processeur interne de la partie interne par radiofréquence, maintenue sur le scalp par un aimant. Au niveau de la partie interne, le processeur interne envoie le signal électrique jusqu'au porte-électrode qui stimule les électrodes spécifiques à une fréquence de stimulation et à un degré de voltage électrique déterminés puis qui transmet ce signal aux fibres nerveuses.

II-4- Indications

Rappelons que la classification des surdités est réalisée en faisant la moyenne arithmétique de seuils de perception sur les fréquences de 250 à 4000 Hz ; pas de surdité de 0 à 20 dB,

surdités légères de 20 à 40 dB, surdités moyennes de 40 à 70 dB, surdités sévères de 70 à 90 dB et surdités profondes au-delà de 90 dB.

La pose d'un implant auditif est systématiquement précédée d'un essai prothétique effectué dans les meilleures conditions. Selon les résultats de cet essai et si l'oralisation est choisie, la pose d'un implant cochléaire peut être décidée.

Les implants cochléaires sont indiqués en France en cas de surdité neurosensorielle sévère à profonde bilatérale. Au niveau des tests audiométriques, une discrimination inférieure ou égale à 50 % en audiométrie vocale avec la liste de Fournier (ou équivalent) est une indication à l'implantation cochléaire. Les tests doivent être pratiqués à 60 dB, en champs libre, avec des prothèses bien adaptées. En cas de fluctuations, une implantation cochléaire est indiquée si le retentissement sur la communication est majeur. La présence d'un certain degré d'audition résiduelle n'est plus une contre-indication à l'implantation.

L'implantation est le plus souvent unilatérale, mais une implantation bilatérale peut être indiquée dans certains cas. Une implantation bilatérale peut être indiquée, en cas de méningite bactérienne, fracture du rocher bilatérale et autres causes de surdité risquant de s'accompagner à court terme d'une ossification cochléaire bilatérale. Il faut intervenir avant que l'ossification ne soit trop avancée. Chez l'enfant tout comme chez l'adulte, l'âge de l'implantation et les tests audiométriques sont deux facteurs déterminants. Chez un adulte, porteur d'un implant cochléaire unilatéral, une implantation bilatérale peut être indiquée en cas de perte du bénéfice audioprothétique du côté opposé provoquant des conséquences socioprofessionnelles ou une perte d'autonomie chez une personne âgée.

Chez l'adulte, il n'y a pas de limite d'âge supérieure à l'implantation cochléaire. Chez le sujet âgé, l'indication est posée après une évaluation psychocognitive. Il n'y a en général pas d'indication de primo-implantation chez l'adulte ayant une surdité prélinguale. (Haute

autorité de santé. Le traitement de la surdité par implants cochléaires ; mise à jour : janvier 2012).

II-5 Mise en place chirurgicale

Un geste chirurgical sous anesthésie générale est nécessaire pour poser la partie interne de l'implant cochléaire. Ce geste, réalisé par un otologiste appartenant à un centre de référence de l'implantation, dure entre 2h et 2h30.

Cette intervention comporte les mêmes risques que toute intervention otologique et nécessite les mêmes précautions. Au CHU de Nancy, un monitoring du nerf facial est systématiquement mis en place. Cependant, il nous apparaît véritablement essentiel uniquement lorsque l'anatomie chirurgicale mastoïdienne comporte une anomalie (malformation, otite chronique, ou antécédents opératoires). Une antibiothérapie prophylactique à type de Cefazoline 2g en IV une heure avant l'opération est réalisée suivant les recommandations de la Société Française d'anesthésie.

L'antisepsie doit être rigoureuse et méthodique. Le tracé de l'incision cutanée rétro et sus-auriculaire est décalé de 2 cm en arrière du sillon auriculaire dans la racine d'implantation des cheveux. Cette incision permet d'être discrète. L'infiltration sous cutanée est réalisée à la xylocaïne adrénaliné 1%. L'incision se fait jusqu'au plan périosté et jusqu'au niveau de l'aponévrose temporale. Les plans profonds sont incisés de manière décalée par rapport à l'incision cutanée. La mastoïde est exposée après avoir réalisé un lambeau périosté à charnière antérieure jusqu'à mettre en évidence le bord postérieur du conduit auditif externe. La mastoïdectomie est réalisée avec une amorce de la tympanotomie supérieure afin de visualiser l'enclume. Puis, une tympanotomie postérieure est effectuée en ménageant un pont osseux de protection de la courte apophyse de l'enclume. A ce stade de l'intervention, la fenêtre ronde doit être visualisée. Ce temps est parfois difficile selon l'anatomie individuelle.

La fenêtre ronde est parfois masquée par le sourcil osseux supérieur et antérieur qui la surplombe. Le lit de l'implant s'effectue sous le muscle temporal après avoir réalisé un refend à travers ce muscle afin de décaler la position de l'implant cochléaire par rapport à l'incision cutanée. La contention du récepteur-stimulateur peut se faire soit par des vis autotaraudantes soit par un fraisage de la corticale afin de créer une logette osseuse en fonction de l'implant. Puis une gouttière est effectuée dans l'os cortical mastoïdien pour le passage du porte-électrode vers la cavité de mastoïdectomie.

L'abord intracochléaire peut se faire soit au niveau de la fenêtre ronde après fraisage du sourcil osseux et ouverture de la membrane secondaire du tympan, soit par une cochléostomie. Cette dernière est réalisée par un fraisage prudent de l'os au promontoire 1 mm en avant et en bas de la fenêtre ronde. L'ouverture de l'endoste peut se faire à la pointe sans aspiration du liquide labyrinthique, juste avant l'introduction du porte-électrode. Il est nécessaire d'obturer l'abord intracochléaire (soit la fenêtre ronde soit la cochléostomie) et la tympanotomie postérieure par, soit des fragments musculaires ou du fascia temporalis, soit un amalgame de poudre osseuse en utilisant ou non de la colle biologique afin d'assurer une étanchéité absolue. Le réamarrage de lambeau périosté évite le collapsus du méat auditif externe. Puis, la fermeture se fait en deux plans (sous-cutané et cutané) sans drain aspiratif. Un pansement type capeline est mis en place.

Le patient sort d'hospitalisation au 3^{ème} jour, après un contrôle radiographique avec une incidence de Stenvers qui précise la position du porte-électrode et sert de référence.

Les complications de l'implantation cochléaire sont actuellement bien documentées (Venail F et al, 2008). Les complications peuvent être classées en quatre catégories : complications per-opératoires, complications post-opératoires mineurs et majeurs et les réimplantations. En per-opératoire, le mauvais placement de l'électrode insérée dans une cellule de l'hypotympanum

ou au niveau du vestibule est rapporté dans 0,80% des cas. Les autres complications sont une oreille geyser c'est-à-dire l'issue de liquide céphalorachidien lors de la cochléostomie, en général dans un contexte d'oreille malformative (0,05 à 0,5 % des cas). Les complications mineures post-opératoires correspondent à celles pouvant être traitées médicalement. Elles regroupent les paralysies faciales transitoires (<1%), l'hématome sous-cutané, les infections traitées sans intervention chirurgicale, acouphène ou stimulation du nerf facial ou douleurs pouvant être résolus par une désactivation d'électrodes et sans perte du bénéfice clinique, vertige ou instabilité non persistant, et la désactivation d'électrodes (0,5%). Les complications majeures post-opératoires correspondent à celles pouvant mettre en jeu le pronostic vital. Elles regroupent les méningites bactériennes soit par une brèche de la dure-mère soit par une mauvaise étanchéité de la cochléostomie ou de la fenêtre ronde, la chirurgie de révision sans remplacement de la partie interne (nécrose importante du scalp, infection sévère, déplacement de l'électrode, perforation tympanique, repositionnement du récepteur, choléstéatome), la chirurgie de remplacement de la partie interne, une extrusion de porte-électrode (0,13 %), acouphènes ou stimulation du nerf facial ou douleurs ne pouvant pas être résolus par une désactivation d'électrodes ou entraînant une perte du bénéfice clinique. Les problèmes de cicatrisation du lambeau pouvaient se voir dans environ 2 % des cas, mais ce type de complication est de plus en plus rare depuis le développement de techniques chirurgicales faisant appel non pas à des lambeaux cutanés mais à de simples incisions. Pour l'étude de Venail F, le taux global de complications est de 16%. Le taux de complications mineures et majeures est de 5,6% et 3,2% respectivement, et le taux de réimplantations est de 7,2%. Le taux de chirurgie de révision est d'environ 10%.

II-6 Anomalie posturale après implantation cochléaire et problématique de l'étude

L'implantation cochléaire peut entraîner un dysfonctionnement du système vestibulaire conduisant à la dégradation de cette fonction en raison de l'effraction labyrinthique lors de l'introduction du porte-électrode. Parmi les mécanismes en cause, les hypothèses sont la modification de l'homéostasie de l'oreille interne, les traumatismes dans l'organe vestibulaire ou l'inflammation entraînant une fibrose ou la perte de cellules ciliées. De plus, la stimulation électrique de l'implant cochléaire peut entraîner ultérieurement un dysfonctionnement dans l'oreille interne (Basta D et al, 2008). Cette dégradation se manifeste par différents signes vestibulaires. La fonction vestibulaire après implantation cochléaire peut être évaluée par l'interrogatoire, l'examen clinique, la vidéonystagmographie avec épreuves caloriques et la posturographie. La plupart des études ont montré un large éventail de symptômes vestibulaires post-opératoires après implantation cochléaire évalués par l'interrogatoire et l'examen clinique tels que des vertiges, des étourdissements ou des déséquilibres, décrits dans moins de 1 à 75% cas (Buchman et al, 2004; Krause et al, 2009; Melvin et al, 2009). D'autres études plus récentes ont évalué la fonction vestibulaire après implantation cochléaire par vidéonystagmographie. Ces études retrouvent une atteinte de l'organe vestibulaire avec une atteinte du saccule et du canal semi-circulaire horizontal dans 6 à 70% des cas sans corrélation avec les symptômes vestibulaires (Buchman et al, 2004; Jacot et al, 2009; Krause et al, 2009a, 2009b, 2010; Melvin et al, 2009). Cependant, peu d'études ont évalué les conséquences posturales liées à l'implantation cochléaire et leurs résultats sont contradictoires. Buchman et al en 2004 ont montré une amélioration du contrôle postural après implantation cochléaire évaluée par un questionnaire, une vidéonystagmographie et par posturographie. Suarez et al en 2007 et Klünter et al en 2009 ont montré par la posturographie qu'il existait une dégradation du contrôle postural avant la chirurgie et qu'il restait compromis après

l'implantation sans aucun effet de la réhabilitation auditive sur l'organisation sensori-motrice. Schwab et al en 2010 ont étudié les effets de la stimulation électro-acoustique sur la fonction vestibulaire, en comparant les performances posturales sur plate-forme informatisée dynamique lorsque l'appareil était allumé et éteint. Toutes ces études se sont intéressées à la conséquence d'un dysfonctionnement vestibulaire lié à l'implantation cochléaire sur le contrôle postural. Toutefois, le contrôle postural n'est pas la seule composante de la fonction d'équilibration. En effet, cette fonction d'équilibration dépend d'une part du contrôle postural mais également de l'orientation de la posture pour permettre à l'individu d'agir sur et dans son environnement. Des études récentes ont souligné le rôle des afférences multisensorielles, en particulier des afférences auditives dans l'orientation de la posture (Maier et Groh, 2009; Spence et Santangelo, 2009).

L'objectif de notre étude est de connaître l'impact de la réhabilitation auditive par implant cochléaire sur la fonction d'équilibration. Pour ce faire, nous avons étudié les effets à long terme de l'implantation cochléaire sur les modalités de contrôle de l'équilibre et des stratégies sensori-motrices.

Matériel et méthode

Ce travail de recherche a été menée à l'Hôpital universitaire de Nancy et a inclus dix patients présentant une perte auditive profonde pour lesquels une indication d'implantation cochléaire était posée (= groupe IC, sept femmes, trois hommes, âge entre 28 et 74 ans) et 10 participants normo-entendant (=groupe témoin, sept femmes, trois hommes, âge entre 24 et 71 ans). Tous les sujets inclus ont été préalablement informés du but de l'étude et ont donné leur consentement éclairé. L'indication pour l'implantation cochléaire était la perte auditive neurosensorielle profonde bilatérale sans gain avec les prothèses auditives conventionnelles. Les causes de la surdité correspondent à une surdité brusque pour 2 patients, l'otospongiose

pour 2 patients, une surdité héréditaire pour 1 patient et une surdité congénitale pour 1 patient sans malformation associée (il s'agissait d'une surdité perceptionnelle non syndromique); pour quatre patients, la cause était inconnue. La tomодensitométrie à haute résolution en coupes osseuses des rochers en pré-opératoire a montré une sclérose cochléaire chez deux patients correspondant au foyer d'otospongiose; il n'existait pas d'anomalie pour les autres patients à la tomодensitométrie. Le même opérateur a réalisé l'implantation du côté droit chez 7 patients (70%) et du côté gauche chez 3 patients (30%). Le choix du côté dépendait d'une éventuelle anomalie de l'anatomie de l'os temporal, et la présence d'un déficit vestibulaire. L'insertion d'électrodes dans la cochlée était complète pour 10 patients. Nous avons posé cinq implants de type Cochlear Nucleus (Cochlear, Macquarie University, Australie) et cinq implants de type Digisonic dispositifs MXM (Neurelec, Vallauris, France). Tous les participants étaient indemnes de toute maladie du système nerveux central, et ne présentaient pas de troubles orthopédiques, soit du tronc soit des membres inférieurs qui pourraient affecter la performance posturale. En outre, aucun participant n'a déclaré présenter des signes de type vertige ou étourdissement après l'intervention. Tous les patients ont été évalués par posturographie statique et dynamique sur une plate-forme de force verticale deux jours avant l'implantation cochléaire (CI1) et un an après (CI2).

Les évaluations visuo-oculomotrices et vestibulaires sont réalisées par vidéonystagmographie (VNG, Synapsys, Marseille, France). Le protocole préopératoire comprenait quatre épreuves. Le premier test est le test visuo-oculo-moteur qui inclut l'évaluation des saccades, de la poursuite oculaire et des mouvements involontaires. Sa normalité autorise le praticien à utiliser le système oculo-moteur du patient comme témoin du fonctionnement de ses vestibules. Le 2^{ème} test est le test du regard qui consiste à rechercher un nystagmus spontané ou de position dans l'obscurité. Le 3^{ème} test est l'épreuve calorique vestibulaire bithermique qui permet d'évaluer le degré de l'asymétrie vestibulaire selon la formule de Jongkees

(Jongkees et Philipzoon, 1964; Gauchard et al, 2003). Les épreuves vestibulaires caloriques ont utilisé une stimulation non physiologique consistant en une irrigation unilatérale successive de chacun des conduits auditifs externes par de l'eau froide (30°C) puis chaude (44°C). Le stimulus thermique est à l'origine d'un déplacement liquidien endolymphatique dans le canal semi-circulaire externe, dont le sens varie en fonction de la température de l'eau. Il en résulte une augmentation de l'activité vestibulaire au chaud et une diminution au froid. Le déséquilibre entre les activités droite et gauche entraîne un nystagmus réflexe battant du côté de la stimulation chaude et du côté opposé à la stimulation froide. Ces épreuves permettent donc de déterminer la réflectivité vestibulaire relative qui exprime précisément la notion de symétrie respective des 2 vestibules. Elle représente le rapport de la somme des réponses nystagmiques enregistrées du côté gauche et celle enregistrées du côté droit. Elle est normalement inférieure à 15%. Le 4^{ème} test est l'épreuve vestibulaire cinétique. Les épreuves cinétiques, consistant en une rotation de la tête et du corps, permettent l'évaluation des 2 labyrinthes simultanément. Pour ce faire, les patients ont été testés sur un fauteuil rotatoire (MED4, Synapsys), les yeux ouverts, dans l'obscurité, le plan des canaux semi-circulaires latéraux étant positionné perpendiculairement à l'axe de rotation du fauteuil. La stimulation cinétique consistait en un mouvement pendulaire amorti comportant 7 oscillations sinusoïdales autour d'un axe vertical, à une fréquence de 0,22 Hz. La plus grande vitesse instantanée de l'impulsion était d'environ 30 ° / s et l'amplitude d'oscillation d'environ 30°. Les mouvements oculaires horizontaux ont été enregistrés et analysés pour calculer le gain du réflexe vestibulo-oculaire (RVO) ainsi que la prépondérance directionnelle (PD) qui reflétait une réponse nystagmique asymétrique à une stimulation vestibulaire symétrique, révélant ainsi un déséquilibre de la fonction vestibulaire. Les mesures de gain du réflexe vestibulo-oculaire ont été déterminées par le rapport entre l'amplitude de la vitesse de l'œil à celle de la vitesse de la chaise. Les mesures de la prépondérance directionnelle ont été calculées par la

vitesse moyenne de la phase lente de l'œil sur la durée du stimulus (Parietti-Winkler et al, 2008, 2010).

Le test d'organisation sensorielle (SOT, Equitest ®, Portland, OR) a été réalisé dans une cabine de posturographie dynamisée de type Equitest. Elle était composée d'une plate-forme munie de capteurs de force, détectant les oscillations du sujet exercées par ses pieds pour maintenir son équilibre. La plate-forme était soit fixe soit asservie aux oscillations antéro-postérieures du centre de gravité (CG) du sujet, qui lui imprimait de façon proportionnelle des mouvements de balancement antéropostérieur. Un panorama entourait le sujet, sur le devant et sur les côtés. Il pouvait être également soit fixe, soit asservi aux oscillations du sujet. Pour chaque évaluation, les patients devaient rester debout sur la plate-forme, les jambes écartées à 30° et les bras le long du corps, en respirant normalement et fixer une image située à hauteur des yeux sur un mur en face d'eux. Ils portaient un harnais de sécurité fixé aux montants de la cabine pour prévenir tout accident en cas de chute. Le test d'organisation sensoriel (SOT) évaluait la capacité des patients à utiliser séparément de façon appropriée les informations visuelles, vestibulaires, et proprioceptives pour contrôler sa position et à rejeter les afférences sensorielles donnant des informations d'orientation inexactes. Afin de fournir une information inadéquate, les entrées visuelles et proprioceptives étaient faussées par la technique de l'asservissement aux oscillations. Cette technique impliquait des mouvements de la surface et/ou du panorama visant à suivre les oscillations antéropostérieures du centre de gravité (Nashner et Peters, 1990). Le SOT comportait 6 conditions sensorielles de réalisations différentes. Dans les 3 premières, la plate-forme était fixe. En condition 1, le panorama était fixe et le sujet avait les yeux ouverts ; il disposait donc des informations visuelles, vestibulaires et proprioceptives toutes concordantes. En condition 2, le panorama était fixe et le sujet avait les yeux fermés ; il ne disposait que des informations vestibulaires et proprioceptives. En condition 3, le panorama était asservi : il suivait exactement les

oscillations du sujet, donnant ainsi au système visuel une fausse information d'immobilité. Dans les 3 conditions suivantes, les informations proprioceptives étaient systématiquement faussées par asservissement de la surface de support. En condition 4, le panorama était fixe et le sujet avait les yeux ouverts ; il disposait des informations visuelles et vestibulaires, entrant en conflit avec les informations proprioceptives erronées. En condition 5, le sujet avait les yeux fermés ; il y avait donc conflit entre les informations vestibulaires et proprioceptives et une absence d'informations visuelles. En condition 6, le panorama était asservi ; il y avait donc conflit entre les informations vestibulaires et les informations erronées provenant des systèmes visuel et proprioceptif. Pour chacune des conditions, le sujet devait se tenir debout pendant 3 essais consécutifs de 20 secondes, avec le minimum de variations posturales et sans modifier son polygone de sustentation. Si le sujet s'appuyait ou faisait un pas, il était considéré comme ayant chuté. La limite théorique de la stabilité était basée sur la taille de l'individu par rapport à la position du centre des pieds. Il représentait un angle ($8,5^\circ$ en avant et $4,0^\circ$ en arrière) au cours duquel la personne pouvait se pencher dans n'importe quelle direction avant que le centre de gravité n'aille au-delà d'un point qui ne lui permette de rester debout (c'est-à-dire de tomber). La formule suivante a été utilisée pour calculer le score d'équilibre: $[12,5^\circ - ((\theta_{\max} - \theta_{\min}) / 12,5^\circ)] \times 100$, où $\theta_{\max}$ indiquait le plus grand angle d'oscillations antéropostérieures du centre de gravité affiché alors que $\theta_{\min}$ indiquait le plus faible angle d'oscillations antéropostérieures du centre de gravité. Un score de 100 indiquait l'absence d'oscillations, tandis qu'un score de 0 indiquait que les oscillations avaient excédé les limites de stabilité, traduisant une chute. Un score d'équilibre (ES) était calculé pour toutes les conditions. $C1^{ES}$ représentait le score d'équilibre moyen des trois essais en condition 1, $C2^{ES}$ en condition 2, $C3^{ES}$ en condition 3, $C4^{ES}$ en condition 4, $C5^{ES}$ en condition 5, $C6^{ES}$ en condition 6. Un score composite d'équilibre (C^{ES}) était calculé en additionnant les scores moyens pour les conditions 1 et 2, puis en ajoutant les scores unitaires d'équilibre pour

chaque essai des conditions 3, 4, 5 et 6, et enfin en divisant cette somme par le nombre total d'essais. C^{ES} était pondéré pour les conditions les plus difficiles et caractérisait le niveau global de la performance du contrôle postural, c'est-à-dire couplé aux situations posturales simples et complexes (avec et sans conflits sensoriels). Chaque score d'équilibre était rapporté à $C1^{ES}$ de manière à évaluer la qualité d'utilisation de chaque système sensoriel impliqué dans le contrôle postural. Le ratio $C2^{ES}/C1^{ES}$ (R^{SOM}) représentait la contribution proprioceptive dans le contrôle de l'équilibre, le ratio $C4^{ES}/C1^{ES}$ (R^{VIS}) la contribution visuelle et le ratio $C5^{ES}/C1^{ES}$ (R^{VEST}) la contribution vestibulaire. De plus, la capacité à s'appuyer sur une orientation visuelle pour s'équilibrer, ou préférence visuelle (R^{REF}), était évaluée en comparant les situations en environnement visuel asservi avec les situations en l'absence de vision $[(C3^{ES} + C6^{ES}) / (C2^{ES} / C5^{ES})]$. La capacité à s'appuyer sur une orientation proprioceptive pour s'équilibrer, ou préférence proprioceptive (R^{PMAN}), était évaluée en comparant toutes les situations de surfaces de support asservi aux situations de surfaces de support fixe $[(C4^{ES} + C5^{ES} + C6^{ES}) / (C1^{ES} + C2^{ES} + C3^{ES})]$ (tableau1) [Nashner et Peters, 1990; Black et al, 1995; Herdman et al, 1995; Colnat-Coulbois et al, 2005; Parietti-Winkler et al, 2006, 2011; Gauchard et al, 2010].

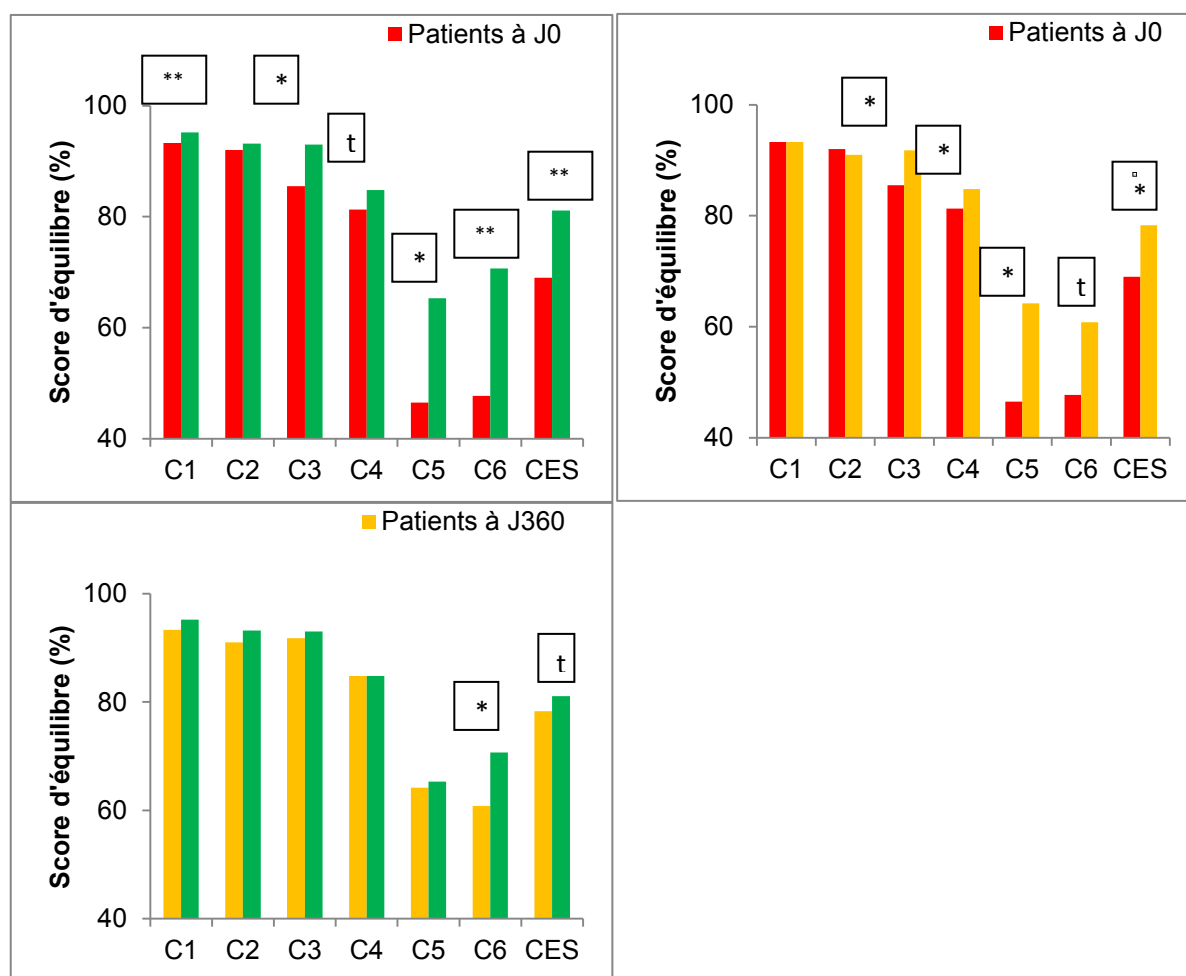
Statistiques

Selon la taille de l'échantillon, les résultats ont été exprimés en termes de médiane associée à un écart-type et, par conséquent, des tests statistiques non paramétriques ont été utilisés. Afin de réaliser des comparaisons intragroupes, c'est à dire entre CI1 et CI2, le test de Wilcoxon (z, comparaison bivariée) a été utilisé pour les paramètres du VOR et du SOT. Pour les comparaisons entre les groupes, c'est à dire entre le groupe témoin et CI1 ou CI2, le test de Mann & Whitney (U, comparaison bivariée) a été réalisé pour le SOT. Des différences statistiquement significatives ont été acceptées pour un niveau de probabilité avec $p \leq 0,05$ et à la limite de la significativité pour un niveau de probabilité avec $p \leq 0,10$.

Résultats

Les données sur l'âge, le sexe, la taille, le poids et l'indice de masse corporelle pour les patients et les témoins sont représentées dans le tableau 2, et aucune différence significative n'a été observée entre les deux groupes. Les groupes sont homogènes et donc comparables. L'évaluation de la poursuite oculaire et des saccades était normale lors du test visuo-oculo-moteur. Lors de l'étude des mouvements oculaires, un patient présentait un nystagmus spontané avant l'implantation cochléaire; d'autre part, aucun nystagmus spontané n'a été observé un an après la chirurgie. Concernant le test aux caloriques, aucun patient ne présentait une normo-réflexie vestibulaire. En effet, du côté de l'oreille destiné à être implanté, 10% des patients présentaient une aréflexie vestibulaire (1 patient) et 90% des patients présentaient une hyporéflexie vestibulaire (9 patients). La fixation visuelle inhibait le nystagmus induit par le test calorique chez tous les patients. Lors de ce test aux caloriques, les comparaisons intra-groupe montraient que le degré d'asymétrie vestibulaire avait tendance à être plus élevé un an après l'implantation cochléaire par rapport au groupe pré-implantatoire (CI1: médiane (M) = 18,0%, IQR = 26,0%; CI2: M = 27,5%, IQR = 19,0%; $z = 1,72$, $p = 0,086$). Pour le test de RVO, les comparaisons intra-groupe montraient que les valeurs de gain étaient plus élevées un an après l'implantation cochléaire qu'avant la chirurgie (CI1: M = 0,37, intervalle interquartile = 0,14; CI2: M = 0,63, intervalle interquartile = 0,10; $z = -2,81$, $p = 0,005$), alors que la prépondérance directionnelle avait tendance à être plus faible (CI1: M = $0,7^\circ / s$, IQR = $0,8^\circ / s$; CI2: M = $0,4^\circ / s$, IQR = $0,5^\circ / s$, $z = -1,73$, $p = 0,084$) (tableau 3). Concernant le SOT (graphique 1 et tableau 4), le C^{ES} était supérieur pour les patients dans le groupe CI2 et dans le groupe témoin par rapport au groupe CI1, principalement en raison de meilleures performances dans les conditions les plus complexes, c'est à dire en C3, C4, C5 et C6, ainsi qu'en C1 mais seulement pour le groupe témoin par rapport au groupe CI1. En outre, la contribution vestibulaire R^{VEST} et la préférence proprioceptive R^{PMAN} étaient meilleures dans

le groupe CI2 et dans le groupe témoin par rapport au groupe CI1. La contribution visuelle R^{VIS} du groupe CI2 et la préférence visuelle R^{PREF} du groupe témoin étaient chacun supérieurs au groupe CI1. Ainsi, alors qu'aucune différence statistiquement significative n'avait été observée entre les patients du groupe CI2 et le groupe témoin concernant les ratios, C^{ES} avait tendance à être plus faible dans le groupe CI2 par rapport au groupe témoin, principalement en raison des performances posturales statistiquement inférieures en C6.



Graphique 1 : Médianes des 6 conditions (C1 à C6) et du score composite d'équilibre (CES) du test d'organisation sensorielle observées dans le groupe de patients avant (J0) et après chirurgie (J360), et dans la groupe de sujets témoins.

- A) Comparaisons entre les patients à J0 et les sujets témoins.
- B) Comparaisons entre les patients à J0 et les patients à J360.
- C) Comparaisons entre les patients à J360 et les sujets témoins.

^t $P \leq 0,1$; * $P \leq 0,05$; ** $P \leq 0,01$

Discussion

Cette étude a montré que les performances vestibulaires et posturales des patients porteurs d'implants cochléaires s'amélioraient un an après l'implantation. Cette amélioration du contrôle postural était surtout observée dans les situations les plus complexes, pour lesquelles l'information n'était pas disponible ou contradictoire. Les afférences vestibulaires et somatosensorielles, ainsi que l'information visuelle étaient mieux utilisées un an après l'implantation cochléaire. Les performances posturales avant l'implantation étaient moins bonnes par rapport aux témoins. Celles des patient après l'implantation se rapprochaient des performances des témoins, même si quelques perturbations persistaient, en particulier dans les situations où un conflit sensoriel était difficile à résoudre, c'est à dire lorsque afférences somatosensorielles et visuelles étaient simultanément perturbées. Le degré de l'asymétrie vestibulaire avait tendance à être plus élevé un an après l'implantation cochléaire par rapport au pré-opératoire, correspondant à une dégradation de l'organe vestibulaire du côté de l'implant. Cependant, cette étude a montré qu'à long terme après l'implantation cochléaire, les patients ne présentaient aucune dégradation de leurs performances posturales, en dépit de l'effraction labyrinthique nécessaire à la mise du porte-électrode. Les valeurs moindres de la prépondérance directionnelle et l'absence de dégradation des performances posturales après l'implantation cochléaire démontraient une bonne compensation de la fonction vestibulaire avec une récupération posturale un an après la chirurgie. Comme cela a été suggéré pour d'autres pathologies vestibulaires, comme le schwannome vestibulaire et son exérèse chirurgicale, les mécanismes d'adaptation mis en œuvre par le système nerveux central et, caractérisés par la substitution par d'autres afférences sensorielles et de nouvelles stratégies comportementales, pourraient permettre la récupération d'un contrôle postural efficient. (Parietti-Winkler et al, 2006). Par conséquent, l'implantation cochléaire unilatérale ne semble pas être délétère pour le contrôle de l'équilibre.

Toutefois, la compensation vestibulaire ne semble pouvoir expliquer à elle seule l'amélioration des performances posturales et la meilleure utilisation des différentes afférences sensorielles. La nouvelle disposition de l'information auditive pourrait contribuer à améliorer le contrôle postural des patients implantés. En effet, la fonction de l'équilibre repose sur le contrôle de la posture, mais aussi sur l'orientation spatiale. Le contrôle de la posture vise à maintenir ou à rétablir l'équilibre en toutes circonstances, en particulier en cas de mouvement ou de déstabilisation. L'orientation spatiale du corps permet à un sujet de percevoir et d'agir dans et sur son environnement (Ceyte et al, 2007). La posture peut donc être considérée comme un support primaire pour l'action (Massion, 1994). Bien que l'information auditive ne soit pas considérée comme un signal fondamental impliqué dans le contrôle de l'équilibre, le système auditif est un système de perception qui, avec la vision et le toucher, est impliqué dans la perception de l'environnement dynamique. De la même manière que les entrées sensorielles sont redondantes et complémentaires pour affiner le contrôle postural au cours des situations de conflit sensoriel (Curthoys et Halmagyi, 1995; Peterka, 2002), la possibilité d'utiliser plusieurs sens pour percevoir l'environnement permet une détection plus pertinente des objets et des événements, conduisant à un comportement d'orientation plus précis (Maier et Groh, 2009; Rowe, 1999). Des études récentes ont montré que les indices sollicitant plusieurs sens étaient plus pertinents vis à vis du repérage dans l'espace que les indices ne sollicitant qu'un sens unique, à condition que ces différents sens soient sollicités de manière simultanée (Folk et al, 2009 ; Ho et al, 2009). La réhabilitation de la fonction auditive pourrait intervenir dans la perception environnementale et l'orientation spatiale après implantation cochléaire et permettre la mise en œuvre de nouveaux réseaux neuronaux, conduisant à de nouvelles stratégies sensori-motrices et comportementales. Ces nouvelles stratégies sensori-motrices et comportementales pourraient améliorer l'efficacité du contrôle postural, en particulier dans les situations de contrôle postural les plus complexes. Ainsi, cette étude a

démontré que les patients sourds et bénéficiant d'un implant cochléaire disposent de nouvelles capacités d'équilibre liées à la récupération de l'information auditive, capacités contribuant largement à l'orientation et interagissant de façon synergique avec les signaux visuels pour guider l'orientation (Colonius et Arndt, 2001; Corneil et al, 2002). Un délai supplémentaire semble nécessaire pour l'évaluation des patients implantés présentant encore des perturbations du contrôle postural. En effet, une étude récente a montré que les performances d'équilibre sont encore améliorées un an après déafférentation vestibulaire unilatérale. Cette amélioration pourrait être la conséquence d'un renforcement des nouvelles stratégies sensori-motrices et comportementales lié aux activités de la vie quotidienne (Parietti-Winkler et al, 2010). Ainsi, les performances posturales, suivant l'âge du patient, nécessiteraient plus d'un an pour atteindre un niveau de contrôle équivalent à des patients sans déficit auditif. Les patients implantés doivent effectuer simultanément plusieurs processus d'apprentissage, tels que la réhabilitation auditive avec l'apprentissage de reconnaissance vocale, la compensation vestibulaire après la dégradation de la fonction vestibulaire liée à la mise en place du porte d'électrodes dans l'oreille interne et, enfin, ce nouveau processus d'apprentissage qui est l'orientation spatiale après réhabilitation auditive.

Conclusion

En conclusion, non seulement l'implantation cochléaire ne semble pas être délétère vis-à-vis des performances posturales, grâce à la mise en œuvre de la compensation vestibulaire, mais elle pourrait aussi, grâce à la réhabilitation de la fonction auditive, permettre la mise en place de nouvelles stratégies sensori-motrices et comportementales de l'équilibration, basées sur de nouveaux réseaux neuronaux. L'augmentation des performances du contrôle postural pourrait avoir un rôle important dans l'amélioration de la qualité de vie observée des patients implantés.

Bibliographie

Basta D, Todt I, Goepel F, Ernst A. Loss of saccular function after cochlear implantation: the diagnostic impact of intracochlear electrically elicited vestibular evoked myogenic potentials. *Audiol Neurotol.* 2008;13(3):187-92. Epub 2008 Jan 22.

Black FO, Paloski WH, Doxey-Gasway DD, Reschke MF: Vestibular plasticity following orbital spaceflight: recovery from posflight postural instability. *Acta Otolaryngologica* 1995;Supplementum 520:450-454.

Buchman CA, Joy J, Hodges A, Telischi FF, Balkany TJ: Vestibular effects of cochlear implantation. *Laryngoscope* 2004;114:1-22.

Ceyte H, Cian C, Zory R, Barraud PA, Roux A, Guerraz M: Effects of Achilles tendon vibration on postural orientation. *Neuroscience Letters* 2007;416:71–75.

Collard M. Voies vestibulaires: de la structure à la fonction. *Rev. Prat. (Paris)*, 1994;44:295-298 .

Colnat-Coulbois S, Gauchard GC, Maillard L, Barroche G, Vespignani H, Auque J, Perrin PP: Bilateral subthalamic nucleus stimulation improves balance control in Parkinson's disease. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry* 2005;76:780-787.

Colonius H, Arndt P: A two-stage model for visual-auditory interaction in saccadic latencies. *Perception & Psychophysics* 2001;63:126-147.

Corneil BD, Van Wanrooij M, Munoz DP, Van Opstal AJ: Auditory-visual interactions subserving goal-directed saccades in a complex scene. *Journal of Neurophysiology* 2002;88:438-454.

Curthoys IS, Halmagyi GM: Vestibular compensation: a review of the oculomotor, neural, and clinical consequences of unilateral vestibular loss. *Journal of Vestibular Research* 1995;5:67-107.

Dichgans J, Brandt T. Visual-vestibular interaction; Effects on self-motion perception and postural control. In : Helb R, Leibowitz H, Teuber H (Eds.), *Handbook of Sensory Physiology* 1978;5:755-804.

Diener HC, Dichgans J, Guschlbauer B, Mau H. The significance of proprioception on postural stabilization as assessed by ischemia. *Brain. Res.*, 1984;296:103-109.

Dubois JP, Levame JH. Anatomie descriptive du pied humain. Maloine, Paris, 1966,429 pp.

Enjalbert M, Rabishong P, Micallef JP, Péruchon E, Viel E, Eledjam JJ, Pélissier L. Sensibilité plantaire et équilibration. In: J Pélissier, V Brun, M Enjalbert (Eds) : Posture, équilibration et médecine de rééducation. Masson, Paris, 1993, pp. 9-23.

Folk CL, Ester EF, Troemel K: How to keep attention from straying: get engaged! *Psychonomic Bulletin & Review* 2009;16:127-132.

Gauchard GC, Gangloff P, Jeandel C, Perrin PP: Physical activity improves gaze and posture control in the elderly. *Neuroscience Research* 2003;45:409–417.

Gauchard GC, Vançon G, Meyer P, Mainard D, Perrin PP: On the role of knee joint in balance control and postural strategies: effects of total knee replacement in elderly subjects with knee osteoarthritis. *Gait & Posture* 2010;32:155-160.

Herdman SJ, Clendaniel RA, Mattox DE, Holliday MJ, Niparko JK: Vestibular adaptation exercises and recovery: acute stage after acoustic neuroma resection. *Otolaryngology Head & Neck Surgery* 1995;113:77-87.

Ho C, Santangelo V, Spence C: Multisensory warning signals: when spatial correspondence matters. *Experimental Brain Research* 2009;195:261-272.

Isableu B, Olhmann T, Crémieux J, Amblard B. Selection of spatial frame of reference and postural control variability. *Experimental Brain Research* 1997;114:584-589.

Jacot E, Van Den Abbeele T, Wiener-Vacher SR: Vestibular impairments pre- and post-cochlear implant in children. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology* 2009;73:209-217.

Jongkees B, Philipzoon AJ: Electronystagmography. *Acta Otolaryngologica* 1964;198:55.

Kluenter HD, Lang-Roth R, Guntinas-Lichius O: Static and dynamic postural control before and after cochlear implantation in adult patients. *European Archives of Otorhinolaryngology* 2009;266:1521-1525.

Krause E, Louza JPR, Hempel JM, Wechtenbruch J, Rade T, Gürkov R: Effect of cochlear implantation on horizontal semicircular canal function. *European Archives of Otorhinolaryngology* 2009a;266:811-817.

Krause E, Wechtenbruch J, Rader T, Gürkov R: Influence of cochlear implantation on sacculus function. *Otolaryngology Head Neck Surgery* 2009b;140:108-113.

Krause E, Louza JPR, Wechtenbruch J, Gürkov R: Influence of cochlear implantation on peripheral vestibular receptor function. *Otolaryngology Head & Neck Surgery* 2010;142:809-813.

Magnusson M, Enbom H, Johansson R, Pyykkö I. The importance of somatosensory information from the feet in postural control in man. In : T Brandt, W Paulus, W Bles, M

Dieterich, S Krafczyk A Straube. Disorders of posture and gait. Thieme Verlag, Stuttgart, 1990, pp. 190-193.

Massion J, Woollacott MH. Posture and equilibrium. In: Bronstein AM, Brandt T, Woollacott M (Eds), *Balance, Posture and Gait* (London :Arnold) 1996;1-18.

Massion J: Movement, Posture and equilibrium: interaction and coordination. *Progress In Neurobiology* 1992;38:35-56.

Massion J. Fonctions motrices. In: Encycl. Méd. Chir. (Neurologie). Elsevier SAS, Paris, 1994,17-002-D-I0, 21 pp.

Maier JX, Groh JM: Multisensory guidance of orienting behavior. *Hearing Research* 2009;258:106-112.

Melvin TA, Della Santina CC, Carey JP, Migliaccio AA: The effects of cochlear implantation on vestibular function. *Otology & Neurotology* 2009;30:87-94.

Nashner LM, Peters JF: Dynamic posturography in the diagnosis and management of dizziness and balance disorders. *Neurologic Clinics* 1990;8:331-349.

Parietti-Winkler C, Gauchard GC, Simon C, Perrin PP: Sensorimotor postural rearrangement after unilateral vestibular deafferentation in patients with acoustic neuroma. *Neuroscience Research*, 2006;55:171-181.

Parietti-Winkler C, Gauchard GC, Simon C, Perrin PP: Visual sensorial preference delays balance control compensation after vestibular schwannoma surgery. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry* 2008;79:1287-1294.

Parietti-Winkler C, Gauchard GC, Simon C, Perrin PP: Long term effects of vestibular compensation on balance control and sensory organization after unilateral deafferentation due

to vestibular schwannoma surgery. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry* 2010;81:934-936.

Parietti-Winkler C, Gauchard GC, Simon C, Perrin PP: Pre-operative vestibular pattern and balance compensation after vestibular schwannoma surgery. *Neuroscience* 2011;172:285-292.

Pelissier J, Braun V, Enjalbert M : Posture, équilibration et médecine de rééducation. Masson, 1993 ; p1.

Peterka RJ: Sensorimotor integration in human postural control. *Journal of Neurophysiology* 2002;88:1097-1118.

Perrin, C : L'homme et ses espaces. Plasticité et limites de l'équilibration. Presse Universitaire de Nancy ; Nancy, 1991, p165.

Perrin C, Conraux C, Collard C, Freyss G, Sauvage JP. L'équilibre en pesanteur et impesanteur. Arnette, Paris, 1987, 413 pp.

Perrin Ph, Lestienne F. Mécanismes de l'équilibration humaine. Exploration fonctionnelle, application au sport et à la rééducation (Paris : Masson) 1994.

Pozzo, T., Berthoz, A., 1992. Physiologie du système vestibulaire et troubles de l'équilibre locomoteur. In : Dupon, Ph. (Ed.), Les troubles de l'équilibre. Paris, Frison-Roche, pp. 1125.

Rowe C: Receiver psychology and the evolution of multicomponent signals. *Animal Behaviour* 1999;58:921-931.

Roll JP, Roll R. La proprioception extra-oculaire comme élément de référence postural et de lecture spatiale des données rétinienne. *Agressologie* 1987;28:905-912.

Sans, A, 1990. Les cellules sensorielles vestibulaires, aspects neurophysiologiques et fonctionnels. In : Morgon, A, Aran, J.M., Collet, L., Dauman, R., Fraysse, B., Freyss, G.,

Pujol, R., Sans, A, Sterkers, O., Tran Ba Huy, P., Uziel, A (Ed.), Données actuelles sur la physiologie et la pathologie de l'oreille interne. Paris, Arnette, pp. 47-55.

Sauvage, J.P., Orsel, S., Morin, R : 1992. Physiologie vestibulaire. *Encycl. Med. Chir. (Otorhino-laryngol.)*,20-037-A-I0,1-15.

Schwab B, Durisin M, Kontorinis G: Investigation of balance function using dynamic posturography under electrical-acoustic stimulation in cochlear implant recipients. *International Journal of Otolaryngology* 2010 Jun; 978594.

Spence C, Santangelo V: Capturing spatial attention with multisensory cues: a review. *Hearing Research* 2009;258:134-142.

Suarez H, Angeli S, Suarez A, Rosales B, Carrera X, Alonso R: Balance sensory organization in children with profound hearing loss and cochlear implants. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology* 2007;71:629-637.

Venail F, Sicard M, Piron JP, Levi A, Artieres F, Uziel A, Mondain M : Reliability and complications of 500 consecutive cochlear implantations. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg.* 2008 Dec;134(12):1276-81.

Tableau1. Test d'organisation sensoriel (EquiTest®, Neurocom®, Clackamas, Oregon, USA): détermination des 6 conditions et de la signification des ratios sensoriels.

Test d'organisation sensoriel			
Conditions Noms	Situation	Indices disponibles	Indice non disponible/altéré
Condition 1 (C1)	Yeux ouverts, plate-forme fixe	Vision, vestibulaire, somatosensoriel	
Condition 2 (C2)	Yeux fermés, plate-forme fixe	Vestibulaire, somatosensoriel	Pas de vision
Condition 3 (C3)	Panorama asservi, plate-forme fixe	Vestibulaire, somatosensoriel	Vision altérée
Condition 4 (C4)	Yeux ouverts, support asservi	Vision, vestibulaire	Somatosensoriel altéré
Condition 5 (C5)	Yeux fermés, support asservi	Vestibulaire	Pas de vision, somatosensoriel altéré
Condition 6 (C6)	Panorama asservi, support asservi	Vestibulaire	Vision altérée, somatosensoriel altéré
Ratios		Signification	
Somatosensorielle (R^{SOM})	C2 / C1	Question: Y-a-t-il une augmentation des oscillations en l'absence des indices visuelles? Score faible: faible utilisation des références somatosensorielles.	
Visuel (R^{VIS})	C4 / C1	Question: Y-a-t-il une augmentation des oscillations en l'absence des indices somatosensoriels? Score faible: faible utilisation des indices visuels.	
Vestibulaire (R^{VEST})	C5 / C1	Question: Y-a-t-il une augmentation des oscillations en l'absence des indices visuelles et avec des indices somatosensoriels altérés? Low scores: faible utilisation des indices vestibulaires.	
Préférence Visuelle (R^{PREF})	(C3+C6) / (C2+C5)	Question: Y-a-t-il une augmentation des oscillations lorsque les indices visuels sont asservis par rapport à l'absence de vision? Low scores: Dépendance des indices visuels même inexacte.	
Préférence proprioceptive (R^{PMAN})	(C4+C5+C6) / (C1+C2+C3)	Question: Y-a-t-il une augmentation des oscillations lorsque la surface de support est asservi par rapport aux situations où la surface de support est fixe? Low scores: faible compensation pour les perturbations des entrées sensorielles sélectionnées.	

Tableau 2. Âge et caractéristiques anthropométriques, exprimées en médiane associée à un intervalle interquartile (IQR), des patients destinés à subir la pose d'un implant cochléaire (IC groupe) multicanal et des participants sains (groupe contrôle). *NS* = non significatif.

	CI groupe, n = 10 median (IQR) / n'	Contrôle groupe, n = 10 median (IQR) / n'	Mann & Whitney test z, p
Age (ans)	55.0 (23.0)	63.0 (16.0)	$z = -0.76$, <i>NS</i>
Taille (m)	1.67 (0.05)	1.65 (0.05)	$z = -0.91$, <i>NS</i>
Poids (kg)	64.0 (30.0)	57.5 (9.0)	$z = -0.99$, <i>NS</i>
Indice masse corporel (kg/m ²)	23.5 (7.2)	21.1 (3.0)	$z = -1.25$, <i>NS</i>

Tableau 3: Résultats de l'évaluation vestibulaire avant (J0) et après chirurgie (J360) :
nystagmus spontané, asymétrie vestibulaire (épreuve calorique), gain et prépondérance
directionnelle (épreuve rotatoire).[†] $P \leq 0,1$; * $P \leq 0,05$; ** $P \leq 0,01$

Patients (n=10)	J0	J360
Nystagmus spontané (%)	10	0
Asymétrie vestibulaire (%) [†]	18	27
Gain, médiane **	0,4	0,6
Prépondérance directionnelle (°/s), médiane [†]	0,7	0,4

Tableau 4. Test d'organisation sensoriel(SOT): Résultats médians, des scores d'équilibre (ES) pour les six conditions, du score composite d'équilibre, et des ratios différents (R^{SOM} , R^{VIS} , R^{VEST} , R^{PREF} et R^{PMAN}) observés pour les patients avant l'implantation cochléaire chirurgie (CI1) et un an après l'implantation (CI2), et pour les témoins, associés à intervalle interquartile (IQR). La signification statistique: $p \leq 0,05$; limite de la significativité: $p \leq 0,10$; ns: non significatif.

SOT		CI ₁ Median (IQR)	CI ₂ Median (IQR)	Témoins median (IQR)	CI ₁ / CI ₂ Significatif	CI ₁ / Témoins Significatif	CI ₂ / Témoins Significatif
Score d'équilibre	C1 ^{ES}	93.3 (1.0)	93.3 (4.7)	95.2 (1.3)	z = -0.48 ns	z = -2.66 p = 0.008	z = -1.40 ns
	C2 ^{ES}	92.0 (6.7)	91.00 (4.0)	93.2 (3.3)	z = -0.53 ns	z = -1.32 ns	z = -1.37 ns
	C3 ^{ES}	85.5 (7.3)	91.8 (4.7)	93.0 (2.7)	z = -2.24 p = 0.025	z = -2.50 p = 0.013	z = -0.80 ns
	C4 ^{ES}	81.3 (9.3)	84.8 (8.0)	84.8 (7.7)	z = -2.14 p = 0.033	z = -1.93 p = 0.054	z = -0.61 ns
	C5 ^{ES}	46.5 (58.0)	64.2 (34.3)	65.3 (8.3)	z = -2.03 p = 0.043	z = -2.42 p = 0.015	z = -0.95 ns
	C6 ^{ES}	47.7 (66.7)	60.8 (24.0)	70.7 (7.0)	z = -1.95 p = 0.052	z = -2.88 p = 0.008	z = -2.35 p = 0.019
	C ^{ES}	69.0 (24.4)	78.3 (16.0)	81.1 (3.2)	z = -2.31 p = 0.021	z = -2.57 p = 0.010	z = -1.66 p = 0.096
Ratios	R ^{SOM}	0.98 (0.07)	0.98 (0.03)	0.98 (0.01)	z = -1.10 ns	z = -0.08 ns	z = -0.62 ns
	R ^{VIS}	0.86 (0.09)	0.92 (0.04)	0.90 (0.07)	z = -2.37 p = 0.018	z = -1.48 ns	z = -0.87 ns
	R ^{VEST}	0.50 (0.62)	0.70 (0.37)	0.69 (0.10)	z = -2.20 p = 0.028	z = -2.27 p = 0.023	z = -0.61 ns
	R ^{PREF}	0.97 (0.36)	1.01 (0.06)	1.02 (0.05)	z = -1.4 ns	z = -2.01 p = 0.044	z = -1.34 ns
	R ^{PMAN}	0.64 (0.37)	0.77 (0.20)	0.81 (0.05)	z = -2.20 p = 0.028	z = -2.32 p = 0.021	z = -1.41 ns

ANNEXE 4

Long term effects of cochlear implant on balance control and sensory organization.

Running head: Cochlear implant and balance control

Cécile Parietti-Winkler, MD, PhD^{*#†}; Rémy Grosjean^{*}; Bettina Montaut-Verient, MD^{*}; André Chays, MD, PhD[§]; Philippe P. Perrin, MD, PhD^{*†‡}; Gérome C. Gauchard, PhD^{*†‡}

^{*}Department of Oto-Rhino-Laryngology, Head and Neck Surgery, University Hospital, Nancy, France.

[#] University of Lorraine, Faculty of Medicine, Vandoeuvre-lès-Nancy, France.

[†] National Institute for Health and Medical Research - Inserm U 954, Faculty of Medicine, Vandoeuvre-lès-Nancy, France.

[§] Department of Oto-Rhino-Laryngology, University Hospital, Reims, France.

[‡] University of Lorraine, UFR STAPS, Villers-lès-Nancy; France.

Correspondence to Cécile Parietti-Winkler, Oto-Rhino-Laryngology, Head and Neck Surgery, University Hospital of Nancy, 29 avenue du Maréchal de Lattre de Tassigny, 54035 Nancy Cedex, France. E-mail: c.parietti@chu-nancy.fr

Abstract

Hypothesis: The control of posture is not the only component of equilibrium function, which also necessitates mechanisms related to spatial orientation, in which auditory cues have a central role.

Background: Many studies were interested in the consequence of vestibular dysfunction related to cochlear implantation on balance control. Recent studies highlighted the role of multisensory cues, and especially auditory ones in the orientation behaviour. This study aimed to assess the long term effects of cochlear implantation and of hearing rehabilitation on the modalities of balance control and sensorimotor strategies.

Method: Posturographic tests were carried out in ten patients with profound hearing loss scheduled to undergo multichannel cochlear implants shortly before (CI₁) and one year after (CI₂) cochlear implantation in 10 healthy participants, as well as vestibular tests in patients.

Results: Although worse than in controls in CI₁, postural performances of patients showed an increase in CI₂ and became close to those of controls, especially in the more complex situations, in which information is either unavailable or conflicting.

Conclusions: Cochlear implantation could allow the implementation of new neural networks, leading to new sensorimotor and behavioural strategies related to the recovery of auditory information. These signals widely participate in spatial orientation and interact with the visual signals to set up and guide orientation behaviour which is a fundamental function of balance control.

Key words: Cochlear implant-Balance control-Sensory organization-Audition-Orientation behaviour.

Introduction

Maintaining equilibrium in upright stance requires the central processing of input signals from the visual, somatokinesthetic and vestibular system, leading to a context-specific motor response through the adjustments of static and dynamic postures [Massion and Woollacott, 1996; Maurer et al., 2006]. Balance control during quiet stance can be viewed as a feedback control system [Fransson et al., 2003], in which information from afferent sensory inputs is redundant and complementary, with a higher contribution of proprioceptive and visual than vestibular inputs, to perceive postural sway [Fitzpatrick and McCloskey, 1994]. However, if either the environmental or task conditions change (especially during sensory conflict situations), orientation information from the various senses is not always available or accurate, forcing the postural control system to higher adjustment and fine-tuning of postural mechanisms to maintain stance [Mergner et al., 1993; Horak et al., 2001; Peterka, 2002]. Then feedforward mechanisms complement and override feedback mechanisms [Johansson et al., 1988], involving internal models of preformed neuromuscular strategies activated automatically or voluntarily as well as sensory reweighing [Tjernström et al., 2009, 2010].

Cochlear implantation, which allows the hearing rehabilitation of patients presenting severe or major deafness for more than 20 years by now, is known to induce vestibular system injury or stimulation, leading to degradation of vestibular function. In this respect, most of the studies have shown a wide range of variation in the appearance of post-operative vestibular symptoms such as vertigo, dizziness or imbalance, described in less than 1% to 75% of cases [Buchman et al., 2004; Krause et al., 2009a; Melvin et al., 2009] and in the post-operative vestibular function assessment; recent studies showed that cochlear implantation caused damage to the sacculus and the horizontal semicircular canal function in between 6 and 70% of cases, without correlation with the vestibular symptoms [Buchman et al., 2004; Jacot et al., 2009; Krause et al., 2009a, 2009b, 2010; Melvin et al., 2009]. However, few studies have

assessed the postural consequences related to cochlear implantation, and their results seem contradictory. Whereas Buchman et al. [2004] showed an improvement of the postural stability after cochlear implantation, Suarez et al. [2007] and Kluenter et al. [2009] showed that postural control was impaired before surgery and remained impaired after implantation, without any effect of hearing rehabilitation on the sensory organization strategy. Schwab et al. [2010] studied the effects of electrical-acoustic stimulation on vestibular function, by comparing postural performances on computerized dynamic posturographic platform when the device was switched-on and switched-off. This study showed that symptoms of dizziness occurred in supposedly noncritical situations, since, while the cochlear implant makes increased demands on the balance system, induced disturbances can be centrally suppressed.

All these studies were interested in the consequence of vestibular dysfunction related to cochlear implantation on balance control. However, the control of posture is not the only component of equilibrium function, which also necessitates mechanisms related to spatial orientation. Recent studies highlighted the role of multisensory cues, and especially auditory ones in the orientation behaviour [Maier and Groh, 2009; Spence and Santangelo, 2009]. In this respect, this study aimed to assess the long term effects of cochlear implantation, and with that of hearing rehabilitation, on the modalities of balance control and sensorimotor strategies.

Materials and methods

Participants

The present study was conducted in the Nancy University Hospital (in North-eastern France) and involved, after informed consent, ten patients with profound hearing loss scheduled to undergo multichannel cochlear implant (CI group, seven women, three men,

range=28-74 years) and 10 healthy participants (control group, seven women, three men, range=24-71 years).

The indication for cochlear implantation was bilateral profound sensorineural hearing loss with no benefit from hearing aids. The causes of deafness were sudden hearing loss (2 patients), otosclerosis (2 patients), hereditary (1 patient) and congenital (1 patient) without associated malformation (nonsyndromic hearing loss); for four patients, the cause was unknown. The preoperative high-resolution petrous bone CT scan showed cochlear sclerosis in one patient; in the remainder were no pathological findings. The operation was performed on the right side in 7 patients (70%) and on the left side in 3 patients (30%) by the same surgeon. The choice of the side depended on abnormal anatomy of the temporal bone and the presence of a vestibular deficit. The electrode insertion in the cochlea was full for 10 patients; five implants were Cochlear Nucleus 24 devices (Cochlear, Macquarie University, Australia) and 5 implants were Digisonic MXM devices (Neurelec, Vallauris, France).

All participants were free from any central nervous system disease, and presented no orthopaedic disorders either of the trunk or the lower limbs that could affect postural performance. Moreover, no participant has declared vertigo or dizziness.

All patients were submitted to gaze control and posturographic evaluation two days before cochlear implantation (CI₁) and one year after (CI₂). Healthy participants were only submitted to posturographic testing.

Gaze control evaluation

The visuo-oculomotor and vestibular assessments were performed with videonystagmography (VNG, Synapsys, Marseille, France).

The preoperative protocol encompassed four tests. (i) The visuo-oculomotor tests included the evaluation of smooth pursuit and saccades and were in a normal range for all the patients. (ii) The gaze test consisted in a recording of spontaneous nystagmus (SN) without visual fixation (darkness). (iii) The bithermal caloric vestibular testing allowed to evaluate the degree of vestibular asymmetry according to the Jongkees formula [Jongkees and Philipzoon, 1964; Gauchard et al., 2003]. On the side of the ear intended to be implanted, 10% of patients presented a vestibular areflexy (1 patient) and 90% a vestibular hyporeflexy (9 patients); no patient presented a vestibular normoreflexy. The visual fixation inhibited the nystagmus induced by the caloric test in all patients. (iv) For the rotary test (VOR test), the patients were investigated in a rotary chair (MED4, Synapsys) with eyes open in a dark room, and the plane of the lateral semi-circular canal was positioned perpendicular to the axis of rotation. The rotary chair test protocol was a pendular test, consisting in seven sinusoidal oscillations about an earth-vertical axis at 0.22 Hz frequency, with increasing then decreasing amplitude. The highest instantaneous velocity of the stimulus was about 30°/s and the highest oscillation amplitude about 30°. Fourier analyses were performed to calculate both the slow phase eye velocity and the chair velocity. The gain measurements of the vestibulo-ocular reflex (VOR) were determined by the ratio of the amplitudes of the eye velocity to those of the chair velocity. The directional preponderance (DP) measurements were determined by the mean slow phase eye velocity over the duration of the stimulus [Parietti-Winkler et al., 2008, 2010].

Posturographic evaluation

The sensory organisation test (SOT, EquiTest®, Clackamas, OR) consists in recording the centre of foot pressure displacements and interprets the results as a use of various sensory inputs. To give inadequate information, somatosensory and visual cues are disrupted by using

a technique commonly referred to as sway-referenced, which involves tilting the support surface and/or the visual surround to directly follow the anterior-posterior sways of the subject's centre of gravity (CoG) [Nashner and Peters, 1990]. The subject's task is to maintain an upright stance during three 20 second tests in six conditions that combine three visual conditions [EO, EC and sway-referenced visual surround motion (SM)] with two platform conditions [stable (S), sway-referenced platform motion (PM)] as follows: EO/S (C1), EC/S (C2), SM/S (C3), EO/PM (C4), EC/PM (C5), SM/PM (C6). The theoretical limit of stability is based on the individual's height and size of the base of support. It represents an angle (8.5° anteriorly and 4.0° posteriorly) at which the person can lean in any direction before the centre of gravity would move beyond a point that allows him/her to remain upright (i.e., point of falling). The following formula was used to calculate the equilibrium score: $[12.5^{\circ} - ((\theta_{\max} - \theta_{\min}) / 12.5^{\circ})] \times 100$, where $\theta_{\max}$ indicates the greatest AP CoG sway angle displayed by the subject while $\theta_{\min}$ indicates the lowest AP CoG sway angle. Lower sways lead to a higher composite score, indicating a better balance control performance (a score of 100 represents no sway, while 0 indicates sway that exceeds the limit of stability, resulting in a fall). Equilibrium scores (ES) were calculated for every condition: the averaged ES of the three trials were $C1^{ES}$ and $C1^{SS}$ in condition 1, $C2^{ES}$ and $C2^{SS}$ in condition 2, $C3^{ES}$ and $C3^{SS}$ in condition 3, $C4^{ES}$ and $C4^{SS}$ in condition 4, $C5^{ES}$ and $C5^{SS}$ in condition 5, and $C6^{ES}$ and $C6^{SS}$ in condition 6. A composite equilibrium score (C^{ES}) was calculated by adding the average scores from conditions 1 and 2 and the ES from each trial of sensory conditions 3, 4, 5 and 6, and finally dividing that sum by the total number of trials, that would smooth the data across all conditions. By using the individual scores for conditions 3, 4, 5 and 6, C^{ES} is effectively weighted to the more difficult conditions and characterizes the overall level of postural control performance, i.e. coupling both simple and complex postural tasks (without and with sensory conflicts). Each ES was adjusted on $C1^{ES}$ to identify the significance of each sensory

system influencing postural control, the $C2^{ES}/C1^{ES}$ ratio representing somatosensory contribution to postural control (R^{SOM}), the $C4^{ES}/C1^{ES}$ ratio the visual contribution (R^{VIS}) and the $C5^{ES}/C1^{ES}$ ratio the vestibular contribution (R^{VEST}). Thus, the ability to rely on vision, even if inadequate, was evaluated by comparing the sway-referenced visual surround with the absence of vision $[(C3^{ES}+C6^{ES})/(C2^{ES}+C5^{ES})]$, which conveys visual preference (R^{REF}). Thus, the ability to manage altered proprioceptive inputs (R^{PMAN}) was evaluated by comparing all the sway-referenced platform conditions with all the fixed platform conditions $[(C4^{ES}+C5^{ES}+C6^{ES})/(C1^{ES}+C2^{ES}+C3^{ES})]$ (Table 1) [Nashner and Peters, 1990; Black et al., 1995; Herdman et al., 1995; Colnat-Coulbois et al., 2005; Parietti-Winkler et al., 2006, 2011; Gauchard et al., 2010].

Participants were requested to stand upright and barefoot at mark level on the support surface to control stance width, remaining as still as possible, breathing normally, and with their arms at their sides, and were instructed to look straight ahead at a picture located on the visual surround. To protect against falls, an operator stood within reaching distance of the participant and all wore a safety harness connected to the ceiling by two suspension straps in all test conditions.

Statistics

According to the sample size, results were expressed in terms of median associated with interquartile range (IQR) and, accordingly, non-parametric statistical tests were used. For intragroup comparison, i.e. between CI_1 and CI_2 , Wilcoxon test (z, pairwise comparison) was used for VOR and SOT parameters. For the intergroup comparisons, i.e. between controls and CI_1 or CI_2 , the Mann & Whitney test (U, pairwise comparison) was performed for the SOT

parameters. Statistically significant differences were accepted for a probability level of $p \leq 0.05$ and borderline significance for a probability level of $p \leq 0.10$.

Results

Data on age, gender, height, weight and body mass index for patients and controls are presented in table 2, and no significant difference was observed between the two groups.

For the gaze test, only one patient presented a spontaneous nystagmus before cochlear implantation; on the other hand, no spontaneous nystagmus was observed one year after surgery. For the caloric test, intra group comparisons showed that the degree of vestibular asymmetry tended to be higher one year after cochlear implantation than before surgery (CI₁: median (M)=18.0%, IQR=26.0%; CI₂: M=27.5%, IQR=19.0%; $z=1.72$, $p=0.086$). For the VOR test, intra group comparisons showed that the gain values was higher one year after cochlear implantation than before surgery (CI₁: M=0.37, IQR=0.14; CI₂: M=0.63, IQR=0.10; $z=-2.81$, $p=0.005$), whereas DP tended to be lower (CI₁: M=0.7°/s, IQR=0.8°/s; CI₂: M=0.4°/s, IQR=0.5°/s; $z=-1.73$, $p=0.084$).

For the SOT analysis (table 3), C^{ES} was better in CI₂ patients and controls compared to CI₁ patients, mainly because of better performances in the more complex conditions, i.e. in C3, C4, C5 and C6, as well as in C1 for controls only. Moreover, R^{VEST} and R^{PMAN} were better in patients in CI₂ patients and controls than in CI₁ patients, as well as R^{VIS} in CI₂ patients and R^{REF} in controls. Thus, whereas no statistically significant difference was observed between CI₂ patients and controls for ratios, C^{ES} tended to be lower in CI₂ patients, mainly because of statistically lower postural performances in C6.

Discussion

This study has shown that patients with cochlear implants displayed an improvement of vestibular and postural performances one year after implantation compared to before surgery. This increase in postural control is mainly observed in the more complex situations, for which information is either unavailable or conflicting. Vestibular and somatokinesthetic afferences were better used one year after cochlear implantation, as well as visual information. Whereas their performances before implantation were worse than those of controls, those after implantation came close, although some perturbations persisted, especially in situations where sensory conflict is difficult to resolve, i.e. when somatosensory and visual afferences were simultaneously disrupted.

This study showed that, at long term after cochlear implantation, patients showed no degradation of their postural performances in spite of the opening of the inner ear and the setting up of the electrode array. Indeed, although the degree of vestibular asymmetry tended to be higher one year after cochlear implantation than before surgery, which corresponds to a degradation of the vestibular function at the side of the implant, the lower values of DP and the absence of degradation of postural performances after cochlear implantation demonstrate a good vestibular compensation as well as a good postural compensation one year after surgery. As it had been suggested in other kinds of vestibular dysfunction, e.g. in the case of vestibular schwannoma, the time-course of implementation of central adaptive mechanisms, characterized by substitution by other sensory afferences and new behavioural strategies, could lead to a recovery of balance control with an improvement in balance performances [Parietti-Winkler et al., 2006]. Therefore, the unilateral cochlear implantation does not seem to be harmful for balance control.

However, the vestibular compensation could not explain alone the major improvement of the postural performances and the better use of the different sensory afferences. Probably auditory information contributes to balance regulation in cochlear implanted patients. Equilibrium function relies on the control of posture but also on spatial orientation. Whether the control of posture aims at maintaining or restoring balance in all circumstances, in particular in case of movement or destabilization, the spatial orientation of body allows a subject to perceive and to act in and on his environment [Ceyte et al., 2007]. Posture can be thus considered as a primary support for action [Massion, 1994]. Although auditory information is not considered as a fundamental signal involved in balance control, the auditory system is a perceptual system which, with vision and touch, is involved in the perception of the dynamic environment. In the same way as sensory inputs are redundant and complementary to fine-tune postural control during sensory conflict situations [Curthoys and Halmagyi, 1995; Peterka, 2002], the ability to use multiple senses to perceive environmental characteristics allows a more relevant detection of objects and events, leading to an accurate orientation behaviour [Maier and Groh, 2009; Rowe, 1999]. Indeed, recent studies showed that multisensory cues were more effective at capturing spatial attention than unimodal cues under conditions of concurrent perceptual tasks [Folk et al., 2009; Ho et al., 2009]. The recovery of auditory role in environmental perception and orientation references after cochlear implantation could initiate motor learning and, in this way, allow the implementation of new neural networks, leading to new sensorimotor and behavioural strategies. These new sensorimotor and behavioural strategies could explain the improvement of postural control efficiency observed here, especially in the more complex postural situations. Thus, this study demonstrated that cochlear implanted patients displayed new balance abilities related to the recovery of auditory information, which widely participates to orientation and interacts with

the visual signals to guide orienting behaviour with a synergy of processing [Colonius and Arndt, 2001; Corneil et al., 2002].

The minor remaining perturbations of postural control in cochlear implanted patients at long term could justify a longer delay for evaluation. Indeed, a recent study showed that balance performances still improved one year after unilateral vestibular deafferentation and that this improvement could be related to a reinforcement of the newly elaborated sensorimotor and behavioural strategies due to daily life activities [Parietti-Winkler et al., 2010]. Thus, postural performances might need more than one year to reach age-matched control level in cochlear implanted patients, who have to perform simultaneously several learning process, such as auditory rehabilitation with speech recognition learning, vestibular compensation after vestibular function degradation related to the setting up of the electrode array in the inner ear and finally and new orienting behaviour learning process after recovery of auditory perception of dynamic environment.

In conclusion, cochlear implantation does seem not to be harmful for postural performances because of vestibular compensation, but could even allow the implementation of new neural networks, leading to new sensorimotor and behavioral strategies related to the recovery of auditory information. The increase of postural control performances could take an important part in the improvement of the quality of life observed in cochlear implanted patients.

References

- Black FO, Paloski WH, Doxey-Gasway DD, Reschke MF: 1995. Vestibular plasticity following orbital spaceflight: recovery from posflight postural instability. *Acta Otolaryngologica* 1995;Supplementum 520:450–454.
- Buchman CA, Joy J, Hodges A, Telischi FF, Balkany TJ: Vestibular effects of cochlear implantation. *Laryngoscope* 2004;114:1–22.
- Ceyte H, Cian C, Zory R, Barraud PA, Roux A, Guerraz M: Effects of Achilles tendon vibration on postural orientation. *Neuroscience Letters* 2007;416:71–75.
- Colnat-Coulbois S, Gauchard GC, Maillard L, Barroche G, Vespignani H, Auque J, Perrin PP: Bilateral subthalamic nucleus stimulation improves balance control in Parkinson's disease. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry* 2005;76:780–787.
- Colonus H, Arndt P: A two-stage model for visual-auditory interaction in saccadic latencies. *Perception & Psychophysics* 2001;63:126–147.
- Corneil BD, Van Wanrooij M, Munoz DP, Van Opstal AJ: Auditory-visual interactions subserving goal-directed saccades in a complex scene. *Journal of Neurophysiology* 2002;88:438–454.
- Curthoys IS, Halmagyi GM: Vestibular compensation: a review of the oculomotor, neural, and clinical consequences of unilateral vestibular loss. *Journal of Vestibular Research* 1995;5:67–107.
- Fitzpatrick R, McCloskey DI: Proprioceptive, visual and vestibular thresholds for the perception of sway during standing in humans. *Journal of Physiology (London)* 1994;478:173–186.

Folk CL, Ester EF, Troemel K: How to keep attention from straying: get engaged! Psychonomic Bulletin & Review 2009;16:127–132.

Fransson PA, Hafström A, Karlberg M, Magnusson M, Tjäder A, Johansson R: Postural control adaptation during galvanic vestibular and vibratory proprioceptive stimulation. IEEE Transactions on Biomedical Engineering 2003;50:1310–1319.

Gauchard GC, Gangloff P, Jeandel C, Perrin PP: Physical activity improves gaze and posture control in the elderly. Neuroscience Research 2003;45:409–417.

Gauchard GC, Vançon G, Meyer P, Mainard D, Perrin PP: On the role of knee joint in balance control and postural strategies: effects of total knee replacement in elderly subjects with knee osteoarthritis. Gait & Posture 2010;32:155–160.

Herdman SJ, Clendaniel RA, Mattox DE, Holliday MJ, Niparko JK: Vestibular adaptation exercises and recovery: acute stage after acoustic neuroma resection. Otolaryngology Head & Neck Surgery 1995;113:77–87.

Ho C, Santangelo V, Spence C: Multisensory warning signals: when spatial correspondence matters. Experimental Brain Research 2009;195:261–272.

Horak FB, Earhart GM, Dietz V: Postural responses to combinations of head and body displacements: vestibular-somatosensory interactions. Experimental Brain Research 2001;141:410–414.

Jacot E, Van Den Abbeele T, Wiener-Vacher SR: Vestibular impairments pre- and post-cochlear implant in children. International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology 2009;73:209–217.

Johansson R, Magnusson M, Akesson M: Identification of human postural dynamics. IEEE Transactions on Biomedical Engineering 1988;35:858–869.

Jongkees B, Philipzoon AJ: Electronystagmography. Acta Otolaryngologica 1964;198:55.

Kluenter HD, Lang-Roth R, Guntinas-Lichius O: Static and dynamic postural control before and after cochlear implantation in adult patients. European Archives of Otorhinolaryngology 2009;266:1521–1525.

Krause E, Louza JPR, Hempel JM, Wechtenbruch J, Rade T, Gürkov R: Effect of cochlear implantation on horizontal semicircular canal function. European Archives of Otorhinolaryngology 2009a;266:811–817.

Krause E, Wechtenbruch J, Rader T, Gürkov R: Influence of cochlear implantation on sacculus function. Otolaryngol. Head Neck Surg 2009b;140:108–113.

Krause E, Louza JPR, Wechtenbruch J, Gürkov R: Influence of cochlear implantation on peripheral vestibular receptor function. Otolaryngology Head & Neck Surgery 2010;142:809–813.

Maier JX, Groh JM: Multisensory guidance of orienting behavior. Hearing Research 2009;258:106–112.

Massion J: Postural control system. Current Opinion in Neurobiology 1994;4:877-887.

Massion J, Woollacott MH: Posture and equilibrium; in Bronstein AM, Brandt T, Woollacott M (eds): Balance, posture and gait. London, Arnold, 1996, pp 1–18.

Maurer C, Mergner T, Peterka RJ: Multisensory control of human upright stance. Experimental Brain Research 2006;171:231–250.

Melvin TA, Della Santina CC, Carey JP, Migliaccio AA: The effects of cochlear implantation on vestibular function. *Otology & Neurotology* 2009;30:87–94.

Mergner T, Hlavacka F, Schweigart G: Interaction of vestibular and proprioceptive inputs. *Journal of Vestibular Research* 1993;3:41–57.

Nashner LM, Peters JF: Dynamic posturography in the diagnosis and management of dizziness and balance disorders. *Neurologic Clinics* 1990;8:331–349.

Parietti-Winkler C, Gauchard GC, Simon C, Perrin PP: Sensorimotor postural rearrangement after unilateral vestibular deafferentation in patients with acoustic neuroma. *Neuroscience Research* 2006;55:171–181.

Parietti-Winkler C, Gauchard GC, Simon C, Perrin PP: Visual sensorial preference delays balance control compensation after vestibular schwannoma surgery. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry* 2008;79:1287–1294.

Parietti-Winkler C, Gauchard GC, Simon C, Perrin PP: Long term effects of vestibular compensation on balance control and sensory organization after unilateral deafferentation due to vestibular schwannoma surgery. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry* 2010;81:934–936.

Parietti-Winkler C, Gauchard GC, Simon C, Perrin PP: Pre-operative vestibular pattern and balance compensation after vestibular schwannoma surgery. *Neuroscience* 2011;172:285–292.

Peterka RJ: Sensorimotor integration in human postural control. *Journal of Neurophysiology* 2002;88:1097–1118.

Rowe C: Receiver psychology and the evolution of multicomponent signals. *Animal Behaviour* 1999;58:921–931.

Schwab B, Durisin M, Kontorinis G: Investigation of balance function using dynamic posturography under electrical-acoustic stimulation in cochlear implant recipients. *International Journal of Otolaryngology* 2010;978594.

Spence C, Santangelo V: Capturing spatial attention with multisensory cues: a review. *Hearing Research* 2009;258:134–142.

Suarez H, Angeli S, Suarez A, Rosales B, Carrera X, Alonso R: Balance sensory organization in children with profound hearing loss and cochlear implants. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology* 2007;71:629–637.

Tjernström F, Fransson PA, Kahlon B, Karlberg M, Lindberg S, Siesjö P, Magnusson M: Vestibular PREHAB and gentamicin before schwannoma surgery may improve long-term postural function. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry* 2009;80:1254–1260.

Tjernström F, Fransson PA, Patel M, Magnusson M: Postural control and adaptation are influenced by preceding postural challenges. *Experimental Brain Research* 2010;202:613–621.

TABLE 1. Sensory organisation test (EquiTest®, Neurocom®, Clackamas, Oregon, USA): determination of the 6 conditions and significance of sensory ratios; SR: sway-referenced.

Sensory Organisation Test			
<i>Conditions</i>	<i>Situation</i>	<i>Available cues</i>	<i>Unavailable or altered cues</i>
Condition 1 (C1)	Eyes open, fixed support	Vision, vestibular, somatosensory	---
Condition 2 (C2)	Eyes closed, fixed support	Vestibular, somatosensory	No vision
Condition 3 (C3)	SR surround, fixed support	Vestibular, somatosensory	Vision altered
Condition 4 (C4)	Eyes open, SR support	Vision, vestibular	Somatosensory altered
Condition 5 (C5)	Eyes closed, SR support	Vestibular	No vision, somatosensory altered
Condition 6 (C6)	SR surround, SR support	Vestibular	Vision altered, somatosensory altered
<i>Ratios</i>	<i>Pair</i>	<i>Significance</i>	
Somatosensory (R^{SOM})	C2 / C1	Question: Does sway increase when visual cues are removed? Low scores: Poor use of somatosensory references.	
Visual (R^{VIS})	C4 / C1	Question: Does sway increase when somatosensory cues are removed? Low scores: Poor use of visual references.	

Vestibular (R^{VEST})	$C5 / C1$	Question: Does sway increase when visual cues are removed and somatosensory cues are inaccurate? Low scores: Poor use of vestibular cues or vestibular cues unavailable.
Visual preference (R^{PREF})	$(C3+C6) / (C2+C5)$	Question: Do inaccurate visual cues result in increased sway compared to no visual cues? Low scores: Reliance on visual cues even inaccurate.
Altered proprioceptive information management (R^{PMAN})	$(C4+C5+C6) / (C1+C2+C3)$	Question: Do inaccurate somatosensory cues result in increased sway compared to accurate somatosensory cues? Low scores: Poor compensation for disruptions in selected sensory inputs.

TABLE 2. Age and anthropometric characteristics, expressed in median associated with interquartile range (IQR), of the patients intended to undergo multichannel cochlear implant (CI group) and of healthy participants (control group). NS: non significant.

	CI group, n = 10 median (IQR) / n'	Control group, n = 10 median (IQR) / n'	Mann & Whitney test z, p
Age (years)	55.0 (23.0)	63.0 (16.0)	z=-0.76, NS
Height (m)	1.67 (0.05)	1.65 (0.05)	z=-0.91, NS
Weight (kg)	64.0 (30.0)	57.5 (9.0)	z=-0.99, NS
Body mass index (kg/m ²)	23.5 (7.2)	21.1 (3.0)	z=-1.25, NS

TABLE 3. *Sensory organization test (SOT): Median results, associated with interquartile range (IQR), of the equilibrium scores (ES) for the six conditions, the composite equilibrium score, and the different ratios (R^{SOM} , R^{VIS} , R^{VEST} , R^{PREF} and R^{PMAN}) observed for the patients before cochlear implant surgery (CI_1) and one year after implantation (CI_2), and for the controls. Statistical significance: $p \leq 0.05$; borderline significance: $p \leq 0.10$; NS: not significant.*

SOT		CI ₁ Median (IQR)	CI ₂ Median (IQR)	Controls Median (IQR)	CI ₁ / CI ₂ Significance	CI ₁ / Controls Significance	CI ₂ / Controls Significance
Equilibrium scores	C1 ^{ES}	93.3 (1.0)	93.3 (4.7)	95.2 (1.3)	z=-0.48 NS	z=-2.66 p=0.008	z=-1.40 NS
	C2 ^{ES}	92.0 (6.7)	91.00 (4.0)	93.2 (3.3)	z=-0.53 NS	z=-1.32 NS	z=-1.37 NS
	C3 ^{ES}	85.5 (7.3)	91.8 (4.7)	93.0 (2.7)	z=-2.24 p=0.025	z=-2.50 p=0.013	z=-0.80 NS
	C4 ^{ES}	81.3 (9.3)	84.8 (8.0)	84.8 (7.7)	z=-2.14 p=0.033	z=-1.93 p=0.054	z=-0.61 NS
	C5 ^{ES}	46.5 (58.0)	64.2 (34.3)	65.3 (8.3)	z=-2.03 p=0.043	z=-2.42 p=0.015	z=-0.95 NS
	C6 ^{ES}	47.7 (66.7)	60.8 (24.0)	70.7 (7.0)	z=-1.95 p=0.052	z=-2.88 p=0.008	z=-2.35 p=0.019
	C ^{ES}	69.0 (24.4)	78.3 (16.0)	81.1 (3.2)	z=-2.31 p=0.021	z=-2.57 p=0.010	z=-1.66 p=0.096
Ratios	R ^{SOM}	0.98 (0.07)	0.98 (0.03)	0.98 (0.01)	z=-1.10 NS	z=-0.08 NS	z=-0.62 NS
	R ^{VIS}	0.86 (0.09)	0.92 (0.04)	0.90 (0.07)	z=-2.37 p=0.018	z=-1.48 NS	z=-0.87 NS
	R ^{VEST}	0.50 (0.62)	0.70 (0.37)	0.69 (0.10)	z=-2.20 p=0.028	z=-2.27 p=0.023	z=-0.61 NS
	R ^{PREF}	0.97 (0.36)	1.01 (0.06)	1.02 (0.05)	z=-1.4 NS	z=-2.01 p=0.044	z=-1.34 NS
	R ^{PMAN}	0.64 (0.37)	0.77 (0.20)	0.81 (0.05)	z=-2.20 p=0.028	z=-2.32 p=0.021	z=-1.41 NS

RÉSUMÉ DE LA THÈSE

Hypothèse: Le contrôle postural n'est pas la seule composante de la fonction d'équilibration. Celle-ci nécessite également des mécanismes liés à l'orientation spatiale, dans lesquels des signaux sonores ont un rôle central.

Contexte: De nombreuses études se sont intéressées aux conséquences sur le contrôle postural des dysfonctionnements vestibulaires liés à l'implantation cochléaire. Des études récentes ont souligné le rôle des informations multisensorielles, et en particulier auditives dans le comportement d'orientation. Ces études visaient à évaluer les effets à long terme de l'implantation cochléaire et de la réhabilitation auditive sur les modalités de contrôle postural et les stratégies sensori-motrices.

Méthode: Les tests posturographiques et vestibulaires ont été menés sur dix patients atteints de surdité profonde devant subir une implantation cochléaire multicanaux ainsi que sur dix témoins en bonne santé. Ces tests ont été réalisés peu de temps avant (CI1) et un an après (CI2) l'implantation cochléaire.

Résultats: Les performances posturales du groupe pré-implantatoire CI1 par rapport au groupe témoin sont moindres. On note une amélioration des performances posturales dans le groupe post-opératoire CI2 par rapport au groupe CI1. Les performances posturales se rapprochent de celles du groupe témoin, en particulier dans les situations les plus complexes, dans lesquelles les informations sensorielles sont asservies ou contradictoires.

Conclusion : L'implantation cochléaire pourrait permettre la mise en œuvre de nouveaux réseaux de neurones, ce qui conduirait à de nouvelles stratégies comportementales sensori-motrices liées à la récupération de l'information auditive. Ces signaux participeraient largement à l'orientation spatiale et interagiraient avec les signaux visuels pour mettre en place et guider le comportement d'orientation qui est une fonction fondamentale du contrôle postural.

TITRE EN ANGLAIS

Long term effects of cochlear implant on balance control and sensory organization.

THÈSE : MÉDECINE SPÉCIALISÉE – ANNÉE 2012

MOTS CLEFS : Implant cochléaire, contrôle postural, organisation sensorielle, audition, comportement d'orientation

INTITULÉ ET ADRESSE :

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

Faculté de Médecine de Nancy

9, avenue de la Forêt de Haye

54505 VANDOEUVRE LES NANCY Cedex
