

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

INTÉGRATION AUDIOTACTILE CHEZ LES PORTEURS DE L'IMPLANT
COCHLÉAIRE

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN KINANTHROPOLOGIE

PAR
SIMON LANDRY

SEPTEMBRE 2012

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier mes parents, sans qui, ultimement, je ne serais pas ici. Je remercie mes parents de m'avoir inculqué les valeurs d'un travail bien fait et de m'avoir encouragé à suivre mon cœur, peu importe où ça me mène, même quand je l'ignore moi-même. Je tiens aussi à remercier mes grands-parents qui m'ont soutenu et encouragés lors de mon parcours académique. Je dédie ce mémoire à ma grand-mère qui m'a silencieusement encouragé à travers mon long parcours académique, mais qui n'a pu être là pour me voir franchir cette récente étape.

J'offre mes plus grands remerciements à mon codirecteur Jean-Paul Guillemot. J'espère avoir atteint ses attentes. Je sais que ses conseils et sa formation ne me quitteront jamais. Je souhaite aussi remercier mon autre codirecteur François Champoux, sans qui je ne serais pas au niveau que je suis. Je suis infiniment reconnaissant de ses conseils et de son expertise. Le respect que j'ai pour ces professeurs est énorme et j'espère un jour avoir une fraction de l'expertise, des connaissances et de l'œil pour la recherche qu'ont ces deux grands professeurs-chercheurs.

À Benoit Bacon, sans qui je ne serais pas dans ce milieu que j'aime. Que ta montée dans le monde académique continue à être météorique. Mes remerciements vont aussi à Dale Stout et David Rittenhouse. Je n'aurais sans doute pas pu accéder à ce programme sans votre appui.

À Franco, Maria, Maggie, Phil, Marianne et tous les autres membres de mon entourage universitaire, merci pour vos conseils et votre compagnie.

À mes amis d'autres milieux, vous ne verrez probablement jamais ceci, mais je vous remercie d'être là pour moi comme j'espère toujours l'avoir été pour vous.

Mon père m'a toujours conseillé de ne pas être un « grand parleur, p'tit faiseur ». Je laisse donc mon travail prendre la parole et j'espère que ce travail sera à la hauteur de vos attentes.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	ii
TABLE DES MATIÈRES	iii
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	v
RÉSUMÉ	viii
ABSTRACT	viii
CHAPITRE I	
REVUE DE LA LITTÉRATURE	1
1.1 Le système auditif.....	2
1.1.1 L'oreille.....	2
1.1.2. Les voies auditives ascendantes	3
1.2 Le système somesthésique	6
1.3 L'intégration de l'information provenant de la modalité auditive et somesthésique....	9
1.4 Les substrats physiques de l'interaction audiotactile.....	10
1.4.1 Les substrats neuronaux de l'intégration audiotactile	11
1.4.2 Les illusions perceptives et l'étude des processus d'intégration multisensorielle chez l'humain	13
1.5 Effets d'une privation sensorielle temporaire sur les capacités d'intégration multisensorielle chez l'humain	15
1.6 Hypothèses.....	17
CHAPITRE II	
TEMPORARY DEAFNESS CAN IMPAIR MULTISENSORY INTEGRATION (ARTICLE SOUMIS À PSYCHOLOGICAL SCIENCE).....	20
CHAPITRE III	
DISCUSSION	44
3.1 Les habiletés unisensorielles chez les porteurs de l'implant cochléaire.....	45
3.2 L'intégration audiotactile chez les porteurs de l'implant cochléaire.....	46
3.3 Interprétation des résultats	488
3.4 Conclusion	51
ANNEXE A	
RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES LORS DE LA TÂCHE DE « L'EFFET DE LA PEAU PARCHEMINÉE »	II
ANNEXE B	
TÂCHES TACTILES UNISENSORIELLES	III

BIBLIOGRAPHIE.....IV

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
1.1 Schéma des principales voies auditives ascendantes chez l'humain.....	5
1.2 Schéma des principales voies tactiles ascendantes chez l'humain.....	8
1.3 Relation entre le seuil d'amplitude requis pour une sensation auditive et tactile en fonction de la fréquence vibratoire du stimulus.....	11
2.1 Moyenne des stimulations auditives tactiles perçues dans les conditions contrôles unisensorielles.....	42
2.2 Moyenne des stimulations tactiles perçues en fonction du nombre de stimulations auditives présenté simultanément avec une stimulation tactile.....	43
4.1 Résultats préliminaires lors de la tâche de « l'effet de la peau parcheminée ».....	II
4.2 Tâches tactiles unisensorielles.....	III

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
2.1 Profile clinique des participants porteurs de d'implant cochléaire	40

RÉSUMÉ

Les résultats des recherches précédentes suggèrent qu'une privation auditive temporaire peut avoir un impact significatif sur les processus audiovisuels de la parole. Cependant, dû à la spécificité des tâches précédemment utilisées, il est trop tôt pour affirmer qu'une privation auditive temporaire a un effet sur l'ensemble des processus d'intégration multisensorielle. Le but de cette recherche est d'examiner si une privation auditive temporaire entrave les autres processus multisensoriels chez l'adulte. Une tâche illusoire audiotactile a été administrée à un groupe de personne ayant une audition normale et un groupe de participants temporairement privés d'audition. Les membres de ce dernier groupe se sont vus restaurer leurs seuils d'audition à l'aide de l'implant cochléaire. Les résultats des conditions contrôles ont confirmé que les membres des deux groupes ont des capacités unisensorielles similaires. Les résultats expérimentaux ont révélé que les participants sourds porteurs de l'implant cochléaire sont incapables d'intégrer l'information auditive et tactile. Considérant la nature de la tâche, ces différences ne peuvent pas être reliées à l'utilisation de l'implant cochléaire. Ces résultats suggèrent qu'une perte auditive temporaire entrave la capacité de fusionner l'information multisensorielle. Une expérience auditive continue semble donc être essentielle au maintien d'une intégration sensorielle normale.

Mots clés : Intégration multisensorielle ; privation temporaire ; surdité ; intégration audiotactile.

ABSTRACT

Previous investigations suggest that temporary deafness can have a dramatic impact on audiovisual speech processing. However, it is too early to assert that temporary deafness can have an effect on multisensory processing at large, due to the very specific nature of the previously used tasks. The aim of this study was to test whether temporary deafness disturbs other multisensory processes in adults. A non-speech temporal audiotactile illusory task was administered to a group of normally hearing individuals and a group of temporarily auditory deprived individuals. Members of this latter group had their auditory detection thresholds restored to normal levels through the use of a cochlear implant. Control conditions revealed that auditory and tactile discrimination capabilities were identical across groups. Whereas normally hearing individuals were able to integrate auditory and tactile information effectively in the context of an audiotactile illusion, temporarily deprived individuals were not. Considering the basic nature of the task, failure to integrate multisensory information could not be explained by the use of the cochlear implant, suggesting that the normally anticipated audiotactile interaction is disturbed following temporary deafness. Our results suggest that an uninterrupted lifetime of auditory input is essential for the maintenance of normal sensory interactions.

Keywords : multisensory integration ; temporary deprivation ; deafness ; audiotactile integration.

CHAPITRE I
REVUE DE LA LITTÉRATURE

Le but de ce mémoire est de déterminer la présence d'interactions entre le système auditif et la modalité tactile chez les porteurs de l'implant cochléaire. Ce mémoire est composé de trois chapitres. Le premier chapitre permet de mettre en contexte l'objectif et les hypothèses de recherche. Le système auditif, le système tactile et le lien entre ces deux modalités sensorielles sont décrits sommairement dans les trois premières sections. Puis, l'importance des processus d'intégration multisensorielle est discutée. Les méthodes et les résultats provenant des études de l'intégration multisensorielle sont présentés en mettant une emphase sur les tâches d'intégration audiotactile chez l'humain. Les effets d'une privation sensorielle sur les capacités d'intégration multisensorielle sont exposés. Finalement, le fonctionnement de l'implant cochléaire ainsi que les observations pertinentes au domaine de l'intégration multisensorielle chez les porteurs de l'implant cochléaire sont présentés. Dans le deuxième chapitre du travail, nous présenterons un article scientifique. Le but de l'article est d'étudier les capacités d'intégration audiotactiles suite à une privation auditive de longue durée chez les individus ayant un implant cochléaire. Le deuxième chapitre contient également la méthodologie employée ainsi que les résultats de l'étude. Finalement, le dernier chapitre du mémoire contient une discussion sur les résultats obtenus.

Le système auditif

L'oreille

Le système auditif permet la perception de fréquences sonores d'environ 20 Hz à 20 000 Hz chez l'humain (Yost & Nielsen, 1985). L'oreille est divisée en trois parties : l'oreille externe, l'oreille moyenne, et l'oreille interne. L'oreille externe est composée du pavillon et du conduit auditif externe. La forme du pavillon modifie les ondes sonores de moyennes et de hautes fréquences (Moore, 2001). Ces modifications sonores influencent la localisation sonore sur le plan vertical (Batteau, 1967). Du pavillon, les ondes sonores parviennent à la membrane tympanique via le conduit auditif externe.

La membrane tympanique relie l'oreille externe à l'oreille moyenne. Celle-ci est composée du tympan et de trois osselets : le marteau, l'enclume et l'étrier. Ceux-ci

permettent de compenser la différence d'impédance acoustique entre l'air et le milieu liquide de la cochlée (Kurokawa & Goode, 1995).

L'oreille interne contient la cochlée, l'organe sensoriel auditif et le système vestibulaire. L'ensemble des cellules et des membranes de la cochlée constitue l'organe de Corti. La cochlée est une structure hélicoïdale composée d'un canal replié sur lui-même et remplie d'un fluide. La fenêtre ovale, sur laquelle repose l'étrier, est située à l'une des bases de ce canal replié, nommé la rampe vestibulaire. Au-delà de l'apex cochléaire, le canal forme la rampe tympanique. Celle-ci se termine à sa base par la fenêtre ronde. Les vibrations causées par les mouvements de la fenêtre ovale produisent des distorsions au niveau de la membrane basilaire, située entre la rampe vestibulaire et la rampe tympanique. Les cellules sensorielles auditives, les cellules ciliées, sont munies de structures filamenteuses, les stéréocils; ceux-ci sont disposés tout le long de la membrane basilaire. Elles ont pour fonction de transformer le mouvement des stéréocils en signal bioélectrique (Yost & Nielsen, 1985). Les distorsions de la membrane basilaire sont organisées de manière tonotopique, c'est-à-dire qu'une vibration causée par un son de haute fréquence occasionne un mouvement à la base de la membrane basilaire et un son de basse fréquence provoque un mouvement à l'apex de la membrane basilaire. Les cellules ciliées font synapse avec les neurones du ganglion spiral (ou ganglion de Corti), lesquelles transmettent les signaux bioélectriques au système nerveux auditif central (Berglund & Ryugo, 1987).

Les voies auditives ascendantes

Les signaux sonores captés par l'oreille sont acheminés au cerveau par les voies auditives ascendantes (voir figure 1). Les afférences du ganglion spiral forment le nerf vestibulo-cochléaire. Les projections afférentes du ganglion spiral vont aux noyaux cochléaires (Landau & Barner, 2009). Ces derniers forment un groupement de trois noyaux : le noyau cochléaire antéroventral, le noyau cochléaire postéroventral et le noyau cochléaire dorsal. Ceux-ci sont situés dans le bulbe rostral au niveau du tronc cérébral. Ils constituent le premier site de projections controlatérales du signal auditif

(Yost & Neilsen, 1985). Le noyau cochléaire antéro-ventral projette des afférences vers le complexe olivaire supérieur (Cant & Casseday, 1986), les noyaux du lemnisque latéral et le collicule inférieur, et ce, bilatéralement. Le noyau cochléaire postéro-ventral projette des afférences aux noyaux bilatéraux du lemnisque latéral (Warr, 1968) et au collicule inférieur. Le noyau cochléaire dorsal projette des signaux vers les noyaux controlatéraux du lemnisque latéral et le collicule inférieur (Osen, 1972).

Le complexe olivaire supérieur, situé au niveau du pont, est composé de structures primaires et périolivaires (Winer & Schreiner, 2005). Le complexe olivaire supérieur est le premier noyau du système auditif à contenir des cellules répondant à la stimulation des deux oreilles (Oliver, Becklus, & Shneiderman, 1995). Les structures primaires du complexe olivaire supérieur sont l'olive médiane supérieure, l'olive supérieure latérale et le noyau médian du corps trapézoïde. Les structures périolivaires entourent ces structures primaires (Bazwinsky et coll., 2003). Les projections de l'olive médiane supérieure se terminent majoritairement dans le collicule inférieur ipsilatéral (Oliver, Becklus, & Shneiderman, 1995). Les projections de l'olive supérieure latérale sont bilatérales et se terminent au niveau du collicule inférieur (Winer & Schreiner, 2005).

L'ensemble de ces projections du complexe olivaire supérieur forme la voie du lemnisque latéral. Les noyaux du lemnisque latéral sont composés de trois structures principales : le noyau dorsal, le noyau intermédiaire et le noyau ventral (Pollak, Burger, & Klug, 2003). Le noyau dorsal envoie des projections au collicule inférieur ipsilatéral et controlatéral ainsi qu'au noyau dorsal controlatéral (Kidd & Kelly, 1996). Le noyau intermédiaire envoie des projections ipsilatérales au collicule inférieur (Grothe, Schweizer, Pollak, Shuller, & Rosemann, 1994). Les projections du noyau ventral sont envoyées au collicule inférieur ipsilatéral (Wu, 1999). Les projections du noyau dorsal et du noyau ventral jouent un rôle inhibiteur au niveau du collicule inférieur. Pour leur part, les neurones du noyau intermédiaire ont un rôle inhibiteur et excitateur au niveau du collicule inférieur (Pollak, Xie, Gittelman, Andoni, & Li, 2011).

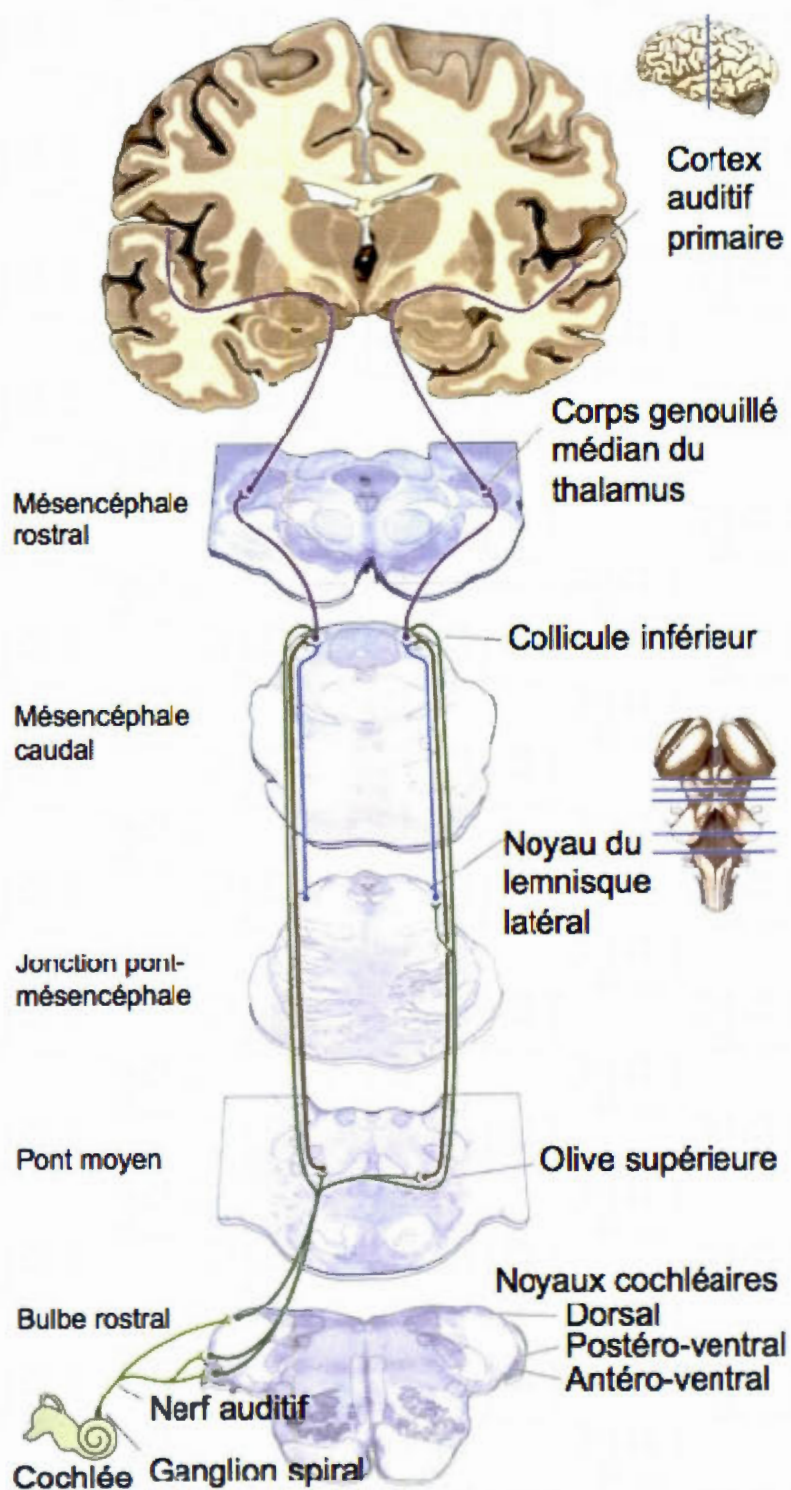


Figure 1 : Schéma des principales voies auditives ascendantes chez l'humain (adapté de Purves, Augustine, Fitzpartick, Hall, LaMantia, McNamara, & Williams, 2005).

Le collicule inférieur est une structure du mésencéphale (Winer & Schreiner, 2005) composée de trois noyaux: le noyau central, le noyau externe, et le noyau péricentral. Les trois noyaux du collicule inférieur projettent des signaux au corps genouillé médian (LeDoux, Ruggiero, & Reis, 1985). Les projections du collicule inférieur vers le corps genouillé médian sont soit excitatrices soit inhibitrices (Merchan et coll., 2005).

Le corps genouillé médian est un regroupement de noyaux thalamique qui se subdivise en trois: le corps genouillé médian ventral, le corps genouillé médian dorsal et le corps genouillé médian médian (LeDoux, Ruggiero, & Reis, 1985). Les axones du corps genouillé médian projettent vers le cortex auditif ipsilatéral, lequel est situé dans le gyrus temporal supérieur du lobe temporal (Le Gros Clark, 1932).

Aux voies auditives ascendantes décrites ci-haut s'ajoutent des influx massifs provenant des voies auditives efférentes (pour plus de détails, voir Helfert & Aschoff, 1997; Sahley, Musiek & Nodat, 1997) formant la voie descendante.

Le système somesthésique

La peau est munie de récepteurs qui analysent les informations sensorielles provenant des zones superficielles de l'enveloppe corporelle. L'information cutanée est essentiellement traitée par des terminaisons mécano-récepterices. L'information thermique est pour sa part traitée par les thermorécepteurs au chaud et au froid. Un troisième système, formé des nocicepteurs, est responsable de la détection des stimulations douloureuses (Iggo, 1982). Le système somesthésique comprend trois composantes : les terminaisons réceptrices, les noyaux des voies ascendantes et les cortex somatosensoriels (voir Figure 2). Quatre types de mécanorécepteurs sont présents au niveau cutané, chacun répondant à une fréquence optimale de stimulation différente. De plus, les mécanorécepteurs peuvent être classifiés en deux catégories physiologiquement distinctes: ceux ayant une adaptation rapide et ceux ayant une adaptation lente lors de la stimulation (Johansson & Vallbo, 1983).

Les mécanorécepteurs ayant une adaptation rapide répondent lors de l'application ou lors du retrait du stimulus. Les corpuscules de Meissner et les corpuscules de Ruffini sont des récepteurs d'adaptation lente (Iggo & Andres, 1982). Les corpuscules de Meissner répondent à des basses fréquence vibratoires \leq à 50 Hz (Gescheider, Bolanowski, Hall, Hoffman, & Verrillo, 1994).

Les mécanorécepteurs ayant une adaptation lente répondent lors l'application ou le retrait d'un stimulus. Les disques de Merkel et les corpuscules de Pacini sont des récepteurs d'adaptation rapide (Iggo & Andres, 1982). Alors que les disques de Merkel répondent à des fréquences vibratoires allant de 5 à 15 Hz (Gilman, 2002), les corpuscules de Pacini répondent préférentiellement entre 200 et 1000 vibrations à la seconde (Sato, 1961).

Lorsqu'un mécanorécepteur, ou terminaison réceptrice, est activé, un potentiel d'action est envoyé par les fibres afférentes des ganglions spinaux vers la moelle cervicale. Les signaux provenant des mécanorécepteurs empruntent la voie des colonnes dorsales-lemnisque médiane dans la moelle cervicale (Coulter, 1974). Les signaux ascendants provenant des régions rostrales au nerf T6, c'est-à-dire, les signaux provenant des bras et du haut du thorax, se rendent jusqu'au noyau cunéiforme dans le bulbe rostral. Les signaux provenant de la partie inférieure du corps se rendent au noyau gracile du bulbe rostral (Gordon & Grant, 1982). Le noyau cunéiforme et le noyau gracile constituent les noyaux des colonnes dorsales. Les neurones de premier ordre transmettent leurs signaux aux neurones de deuxième ordre du bulbe rostral. Les axones de ces neurones traversent du côté controlatéral et forment le lemnisque médian (McGlone & Reilly, 2010). Les signaux des neurones afférents de deuxième ordre sont transmis aux neurones situés dans le complexe des noyaux ventro-postérieurs du thalamus. Celui-ci est composé de trois noyaux : le noyau ventro-postérieur médian du thalamus, le noyau ventro-postérieur latéral du thalamus et le noyau ventro-postérieur inférieur du thalamus (Kenshalo, Giesler, Leonard, & Willis, 1980). Les noyaux ventro-postérieurs du thalamus sont le lieu de convergence des voies somesthésiques ascendantes. Les signaux issus de ce complexe sont acheminés aux cortex somesthésiques.

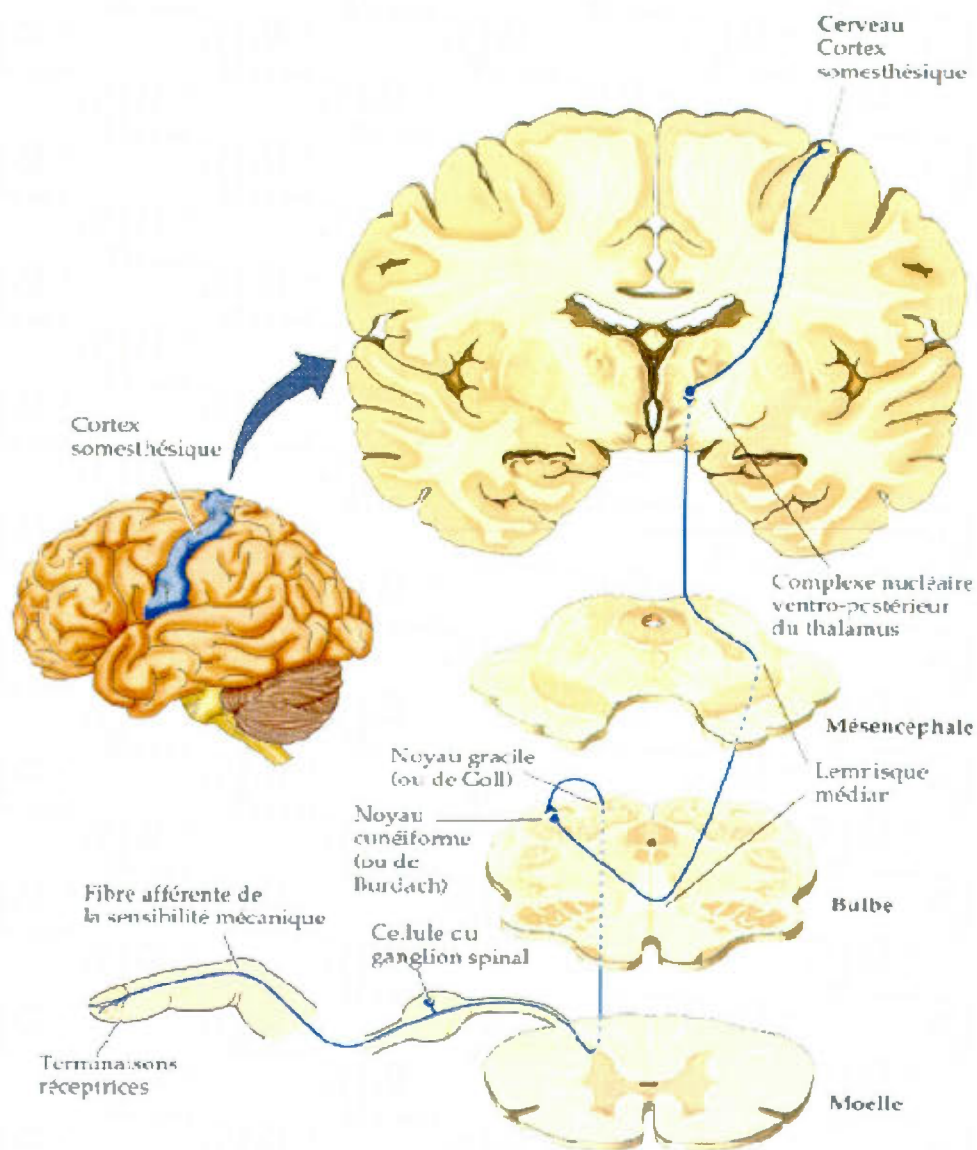


Figure 2 : Schéma des principales voies somesthésiques ascendantes chez l'humain (adapté de Purves et coll., 2005).

Le cortex somesthésique est composé de quatre aires, les aires 3a, 3b, 1 et 2. Deux aires (3b et 1) traitent les informations provenant des zones cutanées; alors que les neurones des aires 3a et 2 analysent des informations cutanées provenant des

muscles et des articulations. Le cortex somesthésique contient plusieurs représentations somatotopiques du corps. La magnification de certaines régions corporelles au niveau du cortex somesthésique reflète la densité des récepteurs au niveau périphérique (Penfield & Boldrey, 1937).

L'intégration de l'information provenant de la modalité auditive et somesthésique

L'intégration multisensorielle désigne la capacité du système nerveux central d'intégrer l'information provenant de différents sens pour en faire une représentation globale et unifiée. Lors de différentes tâches quotidiennes, telles qu'entretenir une conversation (Campanella & Belin, 2007) ou même se raser (Fuxe, 2009), sont plus difficiles à réaliser sans l'usage des processus d'intégration multisensorielle. Ceux-ci permettent d'améliorer les différents percepts en réduisant l'ambiguïté propre à chaque modalité sensorielle (Green & Angelaki, 2010). De telles améliorations perceptives peuvent être observées dans un grand nombre de tâches multisensorielles. Ainsi, lors d'une tâche de détection, le temps de réaction est plus rapide lorsque le stimulus est audiovisuel que lorsqu'il est seulement auditif ou visuel (Giray & Ulrich, 1993; Laurienti, Kraft, Maldjian, Burdette, & Wallace, 2004; Molholm et coll., 2002). De même, les stimuli audiovisuels sont plus facilement localisés que les stimuli auditifs ou visuels (Schröger & Widmann, 1998).

Des interactions sensorielles sont aussi présentes entre la modalité auditive et tactile. Une stimulation tactile présentée simultanément avec une stimulation auditive constante mène à une diminution du seuil de détection tactile (Gescheider & Niblette, 1967). La présence de stimulations tactiles et auditives concordantes engendre une amélioration de la localisation du stimulus tactile (Pick, Warren, & Hay, 1969). La présence d'un nombre discordant de stimulations auditives mène à une modification du nombre de sensations tactiles perçues (Hötting & Röder, 2004). La modification spectrale du son généré par une action tactile engendre une modification de la perception tactile subjective (Joumäki & Hari, 1998).

L'intégration des stimuli audio-tactiles peut être observée chez les adultes (Stein & Stanford, 2008), mais aussi chez le fœtus. Ainsi, une augmentation du rythme cardiaque et une augmentation de la motilité corporelle sont observées lorsqu'un

stimulus audio-tactile est présenté au fœtus (Kisilevsky & Muir, 1991). Les réactions fœtales aux stimulations audiotactiles peuvent être enregistrées dès le troisième trimestre de gestation (Kisilevsky, 1995).

Les substrats physiques de l'interaction audiotactile

Plusieurs parallèles peuvent être faits entre les modalités tactiles et auditives. Ainsi, Von Békésy (1959) affirme que le toucher constitue un modèle fiable de l'étude des processus physiques reliés à l'audition. Il soutient que les effets d'une force mécanique sur la peau et sur la membrane basilaire sont analogues. En effet, les cellules ciliées et certains mécanorécepteurs transmettent des informations similaires : la fréquence et l'intensité d'une force mécanique (figure 3).

Comme le montre la figure 3, les sons graves \leq à 400 Hz sont détectés par les récepteurs cutanés. Ainsi, bien que l'amplitude du stimulus requis pour engendrer une détection sensorielle est différente, une même force mécanique peut engendrer à la fois une perception tactile et auditive. Par exemple, la vibration produite par un diapason maintenu entre les doigts, est à la fois entendue et perçue au niveau tactile par un individu. Puisque les aspects vibratoires, surtout au niveau des basses fréquences, mobilisent simultanément les systèmes tactile et auditif, il y a lieu de se demander si les processus corticaux permettant l'interprétation des informations tactiles et auditives sont les mêmes.

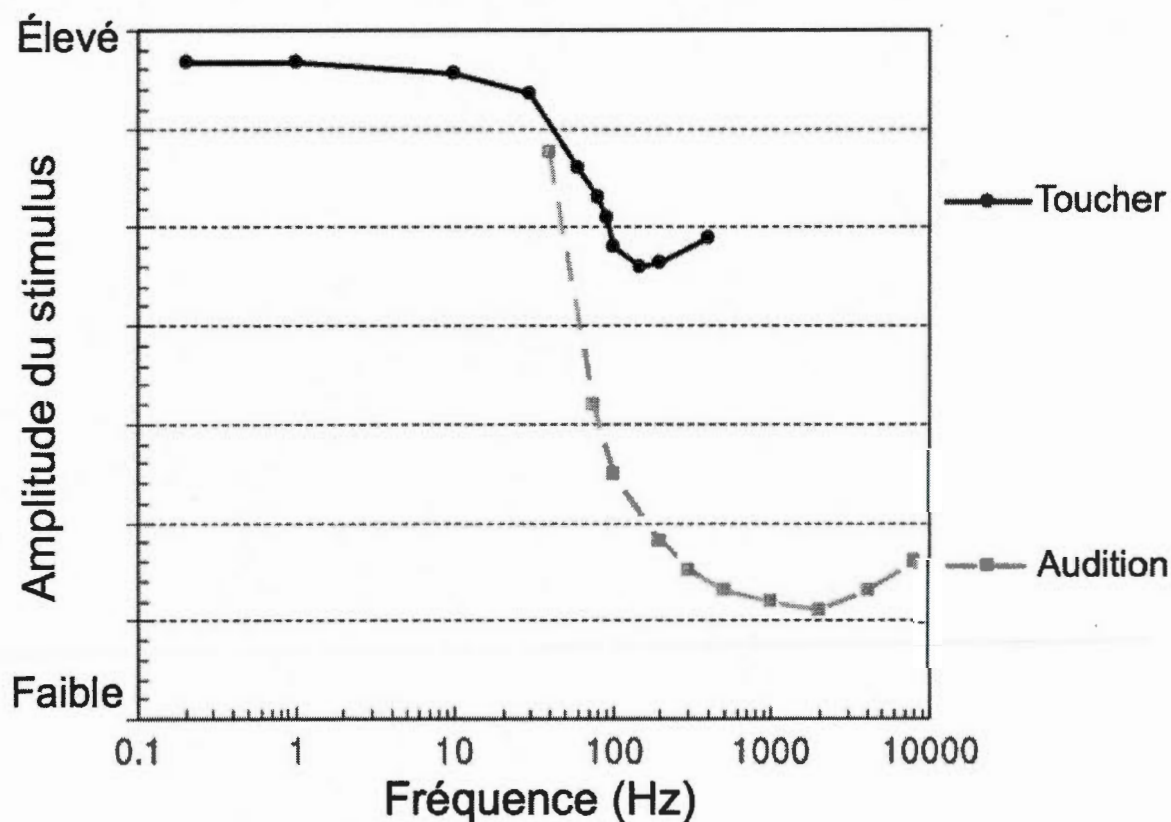


Figure 3 : Relation entre l'amplitude requis pour une sensation auditive et tactile en fonction de la fréquence vibratoire du stimulus (adapté de Soto-Faraco & Deco, 2009).

Les substrats neuronaux de l'intégration audiotactile

L'intégration des signaux provenant de différentes modalités sensorielles prend place tant au niveau du mésencéphale que du cortex cérébral (Stein & Meredith, 1993). Ainsi, le collicule supérieur intègre les informations provenant à la fois des modalités auditives, tactiles et visuelles (Wallace, Meredith, & Stein, 1993). Le collicule supérieur joue un rôle important au niveau des comportements d'attention et d'orientation (Wallace et coll., 1993). L'information provenant de plusieurs modalités sensorielles d'une même zone spatiale suscite une réponse plus élevée des neurones du collicule supérieur que la réponse évoquée par l'information provenant d'une seule modalité sensorielle (Wallace & Stein, 1997). Par contre, les stimuli de différentes modalités sensorielles ayant des origines spatiales discordantes peuvent réduire ou même inhiber la réponse neuronale (Stein, 1998). Selon Wallace et Stein (1997), les stimuli provenant

de plusieurs modalités sensorielles doivent être synchrones afin d'être traités comme provenant d'un même événement et donc susciter une réponse des neurones multisensoriels du collicule supérieur. La fenêtre d'intégration temporelle se situe entre 100 ms et 200 ms (Wallace & Stein, 1997). Cette capacité d'intégration des neurones du collicule supérieur n'est pas innée, mais se développe par l'expérience sensorielle (Wallace & Stein, 2001).

Les résultats de Gobelé, Schürmann, Forss, Juottonen, Buchner, et Hari (2003) suggèrent que l'information multisensorielle peut être traitée au niveau du lobe pariétal. Cette étude utilisant la magnétoencéphalographie démontre une inhibition auditive dans le cortex pariétal postérieur controlatéral ainsi qu'au niveau de l'operculum controlatéral lors d'une stimulation audiotactile (Gobelé, Schürmann, Forss, Juottonen, Buchner, & Hari, 2003). Des convergences audiotactiles ont été trouvées dans les lobes pariétal et temporal du singe. En effet, des régions intégrant l'information auditive et tactile ont été identifiées chez le singe au niveau du cortex postéro-pariétal (Hyvärinen & Poranen, 1974), du cortex temporo-pariétal (Leinonen & Nymen, 1979) et du sulcus temporal supérieur (Hikosaka, Iwai, Saito, & Tanaka, 1988).

L'intégration multisensorielle est souvent considérée comme un processus prenant place exclusivement au niveau des cortex associatifs. Cependant, des convergences audiotactiles ont été mises en évidence au niveau des structures pourtant considérées unimodales. En effet, des stimulations somatotopiques de la main peuvent activer la région de la ceinture caudo-médiane adjacente au cortex auditif primaire chez le singe (Schroeder, Lindsley, Specht, Marcovici, Smiley, & Javitt, 2001). Plus récemment, l'étude de Lakatos et coll. (2007) montre que la réponse des neurones du cortex auditif primaire du singe peut être modifiée par des stimuli tactiles (Lakatos, Chen, O'Connell, Mills, & Schroeder, 2007). Chez l'humain, les résultats de Foxe et coll. (2000) en électro-encéphalographie montrent que l'intégration audiotactile survient aussi dans les aires typiquement unisensorielles. Leurs enregistrements électro-encéphalographie montrent une activation de la région du gyrus postcentral ainsi qu'une activation du cortex auditif postérieur lors d'une stimulation audiotactile. Une seconde étude chez l'humain, en imagerie par résonance magnétique fonctionnelle montre une convergence de l'information auditive et somatotopique provenant des

doigts dans le gyrus temporal supérieur ainsi que dans l'aire BA 22/39, une région analogue à la région de la ceinture caudomédiane du singe (Foxe et coll., 2002).

Les illusions perceptives et l'étude des processus d'intégration multisensorielle chez l'humain

Comme le montrent les études citées ci-haut, il existe de nombreux substrats neuronaux supportant la présence d'interactions entre la modalité auditive et tactile. Par contre, la mise en évidence de ces substrats anatomiques donne peu d'information sur le rôle fonctionnel du processus d'intégration audiotactile. Une façon efficace d'étudier les interactions présentes entre les systèmes sensoriels chez l'humain est d'induire un conflit entre les modalités sensorielles lors de tâches comportementales. Provoquer un conflit entre deux modalités sensorielles par l'utilisation d'illusions permet d'examiner les processus d'interactions entre les systèmes sensoriels en cause. La capacité d'intégrer l'information provenant des différents sens permet aussi de révéler l'importance de chacune des modalités lors de la mise en action dans le processus menant à une perception globale.

L'une des illusions multisensorielles ayant généré le plus d'études est sans contredit l'illusion de « l'effet McGurk » (McGurk & MacDonald, 1976). Cette illusion perceptive combine l'information auditive et visuelle de la parole. Lors de cette tâche, le participant doit indiquer quelle syllabe il perçoit lors d'une présentation audiovisuelle. Pour ce, une première syllabe est présentée auditivement et, simultanément, une seconde syllabe est affichée visuellement. Ainsi, la combinaison de la stimulation auditive /ba/ et de la stimulation visuelle /ga/ est perçue comme étant /da/. La perception de la syllabe /da/ est dans cette situation le résultat de l'intégration de stimulations auditives et visuelles incongrues.

Parmi les autres exemples d'illusions audiovisuelles, on retrouve « l'effet de l'éclair illusoire audiovisuel » (Shams, Kamitani, & Shimojo, 2000). Au cours de cette tâche audiovisuelle, des stimulations visuelles (durée : 17 ms) et auditives courtes (durée : 7 ms) sont présentées simultanément en succession rapide (délais inter-stimulations : auditives 57 ms ; visuelles 50 ms). Le participant porte attention

uniquement au stimulus visuel et compte le nombre de stimulations visuelles présentées. Lorsque les stimulations visuelles sont plus nombreuses que les stimulations auditives, le nombre de stimulations visuelles perçues avoisine le nombre de stimulations auditives présentées. Ainsi lorsqu'une stimulation visuelle est présentée simultanément avec deux stimulations auditives, deux stimulations visuelles sont perçues.

Il existe beaucoup moins d'illusions perceptives révélant l'intégration du système auditif et du système somatosensoriel chez l'humain. Parmi celles-ci se retrouvent la tâche de « l'effet de la peau parcheminée » (Jousmäki & Hari, 1998) et la tâche de « l'effet de l'éclair illusoire » (Hötting & Röder, 2004). La première tâche permet d'évaluer la capacité d'intégration de la composante spectrale de l'information auditive et tactile, alors que la seconde permet d'évaluer les aspects temporels de la capacité d'intégration de l'information auditive et tactile.

Les résultats de Jousmäki et Hari (1998) démontrent que la manipulation de l'intensité des fréquences sonores supérieures à 2 kHz mène à une modification sensorielle au niveau tactile. Plus spécifiquement, les résultats de cette étude montrent qu'il est possible d'influencer la perception tactile lorsque les sons provoqués par une action corporelle, comme se frotter les mains d'avant en arrière, sont modifiés. Une amplification de l'intensité des hautes fréquences provoque une perception de mains sèches alors qu'une diminution de l'intensité des hautes fréquences provoque la perception de mains moites. Malheureusement, l'utilisation de cette dernière tâche dans l'étude des processus d'intégration audiotactile demeure problématique en fonction de nombreux facteurs. En effet, des résultats provenant de notre laboratoire révèlent une grande variabilité des résultats chez les participants ayant une capacité auditive normale (voir Annexe A). En outre, il se peut que l'âge des participants soit un facteur déterminant de cette grande variabilité des réponses. L'utilisation de cette tâche pour l'évaluation des capacités d'intégration audiotactile est, par conséquent, problématique.

À ce moment, l'illusion de Hötting et Röder (2004) de « l'effet de l'éclair illusoire audiotactile » est la plus couramment utilisée lors de l'étude des processus d'intégration audiotactile chez l'humain. Lors de cette illusion, le principe de « l'effet de l'éclair illusoire audiovisuel » (Shams, Kamitani, & Shimojo, 2000) est transposé au niveau

tactile et auditif. Pour ce faire, la stimulation visuelle est remplacée par une stimulation vibrotactile au niveau de l'index. D'une manière similaire à « l'effet de l'éclair illusoire audiovisuel », des stimulations tactiles et auditives de courtes durées (50 ms et 10 ms respectivement) sont présentées simultanément. Le participant doit porter attention aux stimuli tactiles et ignorer les stimulations auditives. Lorsque les stimulations auditives sont plus fréquentes que les stimulations tactiles, un plus grand nombre de stimulations tactiles est perçu.

Effets d'une privation sensorielle temporaire sur les capacités d'intégration multisensorielle chez l'humain

Les effets de la privation sensorielle précoce sur les capacités d'intégration multisensorielle ont fait l'objet de plusieurs études chez l'animal (Stein & Stanford, 2008), ce qui n'est pas le cas chez l'humain. Putzar, Goerendt, Lange, Rösler et Röder (2007) ont récemment montré que la privation visuelle temporaire, causée par des cataractes binoculaires denses durant les deux premières années de vie, a une influence importante sur les capacités d'intégration audiovisuelle suite à la restauration d'une vision normale. Plus spécifiquement, Putzar et coll. (2007) ont démontré que les individus privés temporairement de vision sont incapables d'utiliser efficacement les indices visuels lors d'une tâche de « l'effet McGurk » (Putzar, Goerendt, Lange, Rösler, & Röder, 2007). Ces résultats suggèrent que la perception visuelle de la forme dès les premiers mois de vie est essentielle au développement des capacités d'intégration multisensorielle chez l'humain testé à l'âge adulte.

L'utilisation de l'implant cochléaire offre une solution efficace aux personnes atteintes de surdité sévère et même profonde (Wilson & Dorman, 2008). Au début du 21^e siècle, on dénombre mondiallement au-delà de 120 000 individus atteints de surdité sévère et profonde ayant reçu un implant cochléaire (Fan-Gang, Rebscher, Harrison, Xiaolan, & Haihong, 2008). L'implant cochléaire est une prothèse électronique constituée de deux parties. La composante externe comprend un microphone, un processeur vocal et une antenne émettrice. La composante interne, quant à elle, est implantée au-dessus de la mastoïde. La partie interne comprend un stimulateur

électrique et une tige composée d'un maximum de 22 électrodes, dépendant du modèle utilisé. Cette tige d'électrodes est implantée dans la cochlée. Le fonctionnement de l'implant est relativement simple. Les informations sonores sont d'abord captées par un microphone et elles sont immédiatement acheminées au processeur vocal. À cette étape, le processeur se charge de coder le signal sonore afin qu'il puisse être transformé en un signal électrique. À ce moment, le processeur permet de déterminer quelles électrodes sont stimulées, ainsi que le niveau d'intensité de la stimulation électrique. Puis le signal codé est transmis au récepteur sous-cutané. Le signal est capté par le stimulateur interne, lequel transmet à son tour le signal aux électrodes implantées dans la cochlée. Les électrodes stimulent électriquement des régions spécifiques du nerf auditif. Le signal électrique acheminé à la cochlée est finalement transmis au système nerveux central, comme le seraient les signaux bioélectriques des neurones cillés dans une cochlée saine (Ramsden, 2002; Mens, 2007). L'implant cochléaire transmet les signaux sonores selon une bande passante spectrale plus restreinte que chez un individu normal : cette bande passante varie d'un modèle d'implant à l'autre, mais elle se situe entre 250 Hz et environ 8000 Hz.

Le rétablissement de la modalité sensorielle auditive chez l'individu sourd a des implications importantes au niveau des interactions multisensorielles. Chez les personnes porteuses d'implants cochléaires, des études récentes suggèrent que les processus d'interaction multisensorielle sont perturbés; la perception multisensorielle semble être dominée par le système visuel chez ces personnes lorsque les informations auditives et visuelles ne sont pas congruentes (Desai, Stickney, & Zeng, 2008; Rouger, Fraysse, Deguine, & Barone, 2008; Schorr, Fox, van Wassenhove, & Knudsen, 2005). Une étude récente suggère que chez les porteurs de l'implant cochléaire, la vision peut interférer avec la capacité de reconnaissance vocale du système auditif (Champoux, Lepore, Gagné, & Théoret, 2009). Les résultats de cette étude montrent que la présentation de stimuli visuels mobiles (mouvement des lèvres incongru ou mouvement aléatoire de points) provoque une réduction de la capacité d'identification vocale de mots dissyllabiques chez certains porteurs de l'implant cochléaire.

Les résultats de Champoux, Lepore, Gagné et Théoret (2009) montrent que les processus d'intégration multisensorielle sont perturbés uniquement chez les porteurs de

l'implant cochléaire les moins performants sur le plan de l'identification auditive de la parole alors que les plus performants atteignent des résultats comparables aux participants normaux. Ces résultats suggèrent que les porteurs de l'implant cochléaire les moins performants sur le plan de l'identification auditive de la parole subissent une réorganisation intermodale audiovisuelle. Des résultats récents de Landry et coll. (2012) confirment cette dernière hypothèse. Cette réorganisation est plus importante chez les porteurs de l'implant cochléaire non performant que chez les plus performants (Doucet, Bergeron, Lassonde, Ferron, & Lepore, 2006; Giraud & Lee, 2007; Lee et coll., 2001).

Tremblay, Champoux, Lepore, et Théoret (2010) ont récemment montré que les porteurs de l'implant cochléaire les moins performants sur le plan de l'identification auditive de la parole obtiennent des résultats atypiques dans la tâche de « l'effet McGurk ». Chez ceux-ci, la perception multisensorielle est dominée par le système visuel lorsque les informations auditives et visuelles sont incongrues. Par contre, les résultats de l'étude révèlent que les porteurs de l'implant cochléaire les plus performants utilisent l'information visuelle et auditive, et ce, de manière relativement similaire aux personnes ayant une audition normale. La méta-analyse de Schwartz (2010) confirme l'hypothèse de Tremblay, Champoux, Lepore et Théoret (2010) selon laquelle les capacités d'intégration multisensorielle sont dépendantes du niveau de performance auditive chez les porteurs de l'implant cochléaire.

L'étude de Hötting et Röder (2009) montre que chez les individus aveugles, la mise en action des processus multisensoriels dépend de l'expérience. La présence d'une réorganisation intermodale au niveau des aires auditives chez l'individu sourd a été démontrée à plusieurs reprises. Ainsi, la stimulation visuelle avec des stimuli visuels mobiles active les aires auditives chez les personnes sourdes (Armstrong, Neville, Hillyard, & Mitchell, 2002; Finney, Fine, & Dobkins, 2001; Hirano et coll., 2000; Nishimura et coll., 1999; Petitto et coll., 2000; Sadato et coll., 2005).

Hypothèses

Contrairement aux interactions audiovisuelles, les interactions du système auditif avec les autres modalités sensorielles telles que les interactions audiotactiles sont peu

étudiées. Pourtant, certaines études récentes suggèrent que les interactions entre les modalités auditives et tactiles sont essentielles lors du développement des processus fondamentaux (Soto-Faraco & Deco, 2009), reliés à la communication et à la production de la parole (Gick & Derrick, 2009; Ito, Tiede, & Ostry, 2009; Tremblay, Shiller, & Ostry, 2003). L'enregistrement de l'activité cérébrale par magnétoencéphalographie suggère une importante réorganisation intermodale somatosensorielle chez les personnes atteintes de surdité sévère ou profonde. En effet, la stimulation vibrotactile engendre une réponse enregistrée par magnétoencéphalographie dans les aires auditives associatives de l'individu sourd, alors qu'une telle stimulation n'active habituellement que les aires somatosensorielles chez l'individu ayant une audition normale (Sharma, Gilley, Dorman, & Baldwin, 2007).

Cependant, aucune étude ne s'est penchée sur les interactions entre les systèmes auditifs et somatosensoriels chez l'individu sourd porteur de l'implant cochléaire lors de tâches audio-tactiles.

Tel que mentionné précédemment, chez les personnes sourdes ayant un implant cochléaire, les processus d'interaction audiovisuelle sont perturbés (Desai et coll., 2008; Rouger et coll., 2007; Schorr et coll., 2005). De plus, les porteurs de l'implant cochléaire les moins performants du point de vue auditif subissent une réorganisation cérébrale plus importante (Doucet et coll., 2006; Giraud & Lee, 2007; Lee et coll., 2001). Cependant, certaines études suggèrent que les processus d'intégration multisensorielle sont perturbés uniquement chez les porteurs de l'implant cochléaire les moins performants sur le plan de l'identification auditive de la parole (Champoux et coll., 2009; Schwartz, 2010; Tremblay et coll., 2010). Contrairement à l'interaction audiovisuelle, l'interaction du système auditif avec les autres modalités sensorielles, telle que l'interaction audiotactile, est peu étudiée chez l'individu désafférenté. Si un déficit d'intégration multisensorielle a pu être révélé dans le domaine audiovisuel, on ne sait toujours pas si ce déficit peut être généralisé aux autres modalités sensorielles chez les porteurs de l'implant cochléaire. Certains résultats suggèrent, tout comme pour la réorganisation intermodale visuelle (Armstrong et coll., 2002; Finney et coll., 2001; Hirano et coll., 2000; Nishimura et coll., 1999; Petitto et coll., 2000; Sadato et coll., 2005), la présence d'une réorganisation intermodale somatosensorielle importante chez

les personnes atteintes de surdité severe ou profonde (Sharma et coll., 2007). Ces résultats laissent supposer que la réorganisation intermodale somatosensorielle entrave les interactions entre le système auditif et le système tactile lors de la restauration de la modalité auditive chez certains porteurs de l'implant cochléaire.

L'hypothèse générale de la présente étude prévoit que les porteurs de l'implant cochléaire auront des résultats plus faibles que les sujets ayant une audition normale lors d'une tâche d'intégration audiotactile.

Plus spécifiquement, lors de l'illusion de « l'effet de l'éclair audiotactile », les porteurs de l'implant cochléaire percevront moins de stimuli tactiles que les sujets du groupe témoin ayant une audition normale.

De plus, les résultats des études citées précédemment permettent d'avancer l'hypothèse d'une corrélation positive entre la performance lors de l'illusion de « l'effet de l'éclair audiotactile » et la performance lors de l'identification auditive de la parole. Ainsi, plus la performance des sujets porteurs de l'implant cochléaire sera élevée, plus leur capacité d'intégration audiotactile, telle que mesurée par l'intégration lors d'une illusion audiotactile, sera grande. Une corrélation positive entre le niveau de performance lors de la tâche d'intégration et la performance auditive à l'aide de l'implant cochléaire dans une tâche d'identification auditive de la parole sera révélée.

CHAPITRE II

Landry, S., Guillemot, J.-P., & Champoux, F. (2012) Temporary deafness can impair multisensory integration (article soumis à Psychological Science).

Temporary deafness can impair multisensory integration

Simon Landry^{1,2}, Jean-Paul Guillemot^{1,2}, and François Champoux^{1,3,4}

¹Centre de Recherche en Neuropsychologie et Cognition (CERNEC), Montréal, Québec, Canada ; ²Département de Kinanthropologie, Université du Québec à Montréal ; ³Centre de recherche interdisciplinaire en réadaptation du Montréal métropolitain, Institut Raymond-Dewar, Montréal, Québec, Canada ; ⁴École d'orthophonie et d'audiologie, Université de Montréal, Montréal, Québec, Canada.

Short title: Temporary deafness and multisensory integration

Corresponding author:

François Champoux Ph.D.
École d'orthophonie et d'audiologie
Faculté de médecine, Université de Montréal
C.P. 6128, Succursale Centre-Ville
Montréal (Québec), H3C 3J7
Tél. : (514) 343-6111 #37181
Fax.: (514) 343-2115
E-mail: francois.champoux@umontreal.ca

Number of page:	19
Number of figures:	2
Number of characters in title:	54
Number of words in abstract:	148

Abstract

Previous investigations suggest that temporary deafness can have a dramatic impact on audiovisual speech processing. The aim of this study was to test whether temporary deafness disturbs other multisensory processes in adults. A non-speech audiotactile illusory task was administered to a group of normally hearing individuals and a group of temporarily auditory deprived individuals. Members of this latter group had their auditory detection thresholds restored to normal levels through the use of a cochlear implant. Control conditions revealed that auditory and tactile discrimination capabilities were identical across groups. Whereas normally hearing individuals were able to integrate auditory and tactile information effectively in the context of an audiotactile illusion, temporarily deprived individuals were not. Considering the basic nature of the task, failure to integrate multisensory information could not be explained by the use of the cochlear implant, suggesting that the normally anticipated audiotactile interaction is disturbed following temporary deafness.

Keywords: Multisensory integration; temporary privation; deafness; audiotactile integration.

Recent experiments have shown that blindness caused by congenital bilateral cataracts during the first five months of life result in permanent deficits in multisensory interactions capabilities (Putzar, Goerendt, Lange, Rösler, & Röder, 2007; Putzar, Hötting, & Röder, 2010). These experiments with children treated for congenital bilateral cataracts following varying periods of visual privation shed light on the role of visual inputs for the normal development of audiovisual speech processing. The results showed that visual input is necessary for the development but also for the maturation of such important processes.

The effects of temporary auditory deprivation on multisensory processing have also received some attention. Auditory detection thresholds can sometimes be restored via a cochlear implant (CI) (Ponton et al., 1996). Auditory processing with a CI happens without delay allowing individuals to detect sounds at normal levels in real time, although the fine structure of the sound is essentially lost in the process (e.g. Drennan & Rubinstein, 2008). This device, which replaces the function of the inner ear, has allowed researchers to ascertain the consequences of temporary deafness on multisensory processing. The ability to fuse incongruent audiovisual speech information in temporarily deaf individuals has been studied over the past decade. Schorr and his colleagues (Schorr, Fox, Wassenhove, & Knudsen, 2005) used McGurk-like stimuli, wherein incongruent lip movements can induce the misperception of spoken syllables (McGurk & MacDonald, 1976), to investigate the ability to integrate incongruent multisensory cues in children with a CI (Schorr et al., 2005). In children aged two and a half years or younger, the authors found normal-like results in the audiovisual speech task. Contrarily, the fusion capability in children that had their audition restored later in life was reduced. Since Schorr et al. (2005), the results have been replicated in temporarily deaf individuals of various ages in a number of audiovisual tasks involving speech elements (e.g. Rouger, Fraysse, Deguine, & Barone, 2008;

Rouger et al., 2007; Desai, Stickney, & Zeng, 2008; Champoux, Lepore, Gagné, & Théoret, 2009; Tremblay, Champoux, Lepore, & Théoret, 2009). This body of research suggests that temporary profound deafness can have a dramatic impact on audiovisual speech processing when it occurs in adulthood.

Due to the nature of the previously used tasks, it is too early to affirm that temporary deafness can have an effect on multisensory processing at large. The interactions of the auditory input provided by the CI were exclusively examined in relation to the visual domain. Moreover, speech stimuli were always involved in these multisensory evaluations. Speech recognition performance in deaf individuals with a CI is, as opposed to auditory detection capability, highly variable and unpredictable (Green, Katiri, Faulkner, & Rosen, 2007). According to Schwartz (2010), it is unclear whether performance in the audiovisual speech fusion process actually reflects differences in integration per se or is merely the consequence of differences in unisensory perception. Since a reduced ability to recognize the auditory speech stimuli exists in some users, it is not surprising that some deaf individuals using a CI rely more on visual cues in audiovisual speech tasks (i.e. Champoux et al., 2009; Tremblay et al., 2010; Landry et al., 2012). Consequently, such intersubject variability in the recognition of speech components renders the results difficult to interpret regarding differences in multisensory integration. Thus, the impact of an important occurrence such as temporary auditory deprivation in humans remains uncertain.

In order to examine whether temporary deafness can have an impact on the development of multisensory processes, the performance of temporarily deaf individuals needs to be examined i) in other sensory modalities (e.g. an audiotactile task), and ii) in a task that can match more precisely intersubjects' unisensory capabilities across groups and individuals. Here, we used the Audiotactile Illusory Flash Effect (Bresciani et al., 2005; Hötting & Röder, 2004; Hötting,

Friedrich, & Röder, 2009); a non-speech illusory percept in which the presentation of a single somatosensory stimulus presented simultaneously with two successive sounds can lead to the perception of two distinct tactile sensations in normally hearing individuals. In addition to the very specific nature of the stimuli used in this task (i.e. discrimination of non-speech elements), control tasks permit the separation of unisensory performance from the multisensory performance.

Method

Participants

Thirty participants (15 temporarily deaf individuals and 15 normal-hearing subjects matched for handedness, sex and age) were involved in the study. All temporarily deaf individuals (4 male; mean age: 45 years; range: 22-65 years) had lost their hearing for a period of 13 to 53 years (see table 1). All participants suffered from profound bilateral hearing loss (puretone detection thresholds at 80 dB HL or greater at octave frequencies ranging from 0.5 to 4 KHz). The principal method of communication for all temporarily deaf individuals was oral/lipreading. For all temporarily deaf individuals using a CI, and their matched subjects, pure-tone detection thresholds were within normal limits (30 dB HL or less) at octave frequencies ranging from 250 to 4000 Hz. The Research Ethics Board of the Université de Montréal approved the study and all the participants provided written informed consent.

Procedure, stimuli, and design

Prior to testing, auditory and tactile capabilities were tested to further ensure unisensory homogeneity for both groups. Tactile capabilities were examined with a touch-pressure detection test, a grating orientation discrimination task, a two-point discrimination task and a vibrotactile discrimination task (for more details on these procedures, see respectively Bell-Krotoski & Tomancik, 1987; Van Boven & Johnson, 1994; Boscheinen-Morrin & Conolly, 2001; Alary et al., 2009). No significant differences were found between groups for any of the unisensory tactile tasks ($p > 0.05$).

An auditory discrimination task was used to ensure that all participants were able to discriminate different series of auditory stimuli presented successively. Trials consisting of 1, 2, 3, or 4 auditory stimuli (2100 Hz, duration: 10 ms) were presented 10 times in random order with an interval of 100 ms between auditory stimuli. Auditory stimulations were delivered via attenuating circumaural headphones (10 S/DC, David Clack, Worcester, MA, USA) at a comfortable level (60-70 dB HL) for all participants. For temporarily deaf individuals using a CI, the headphones were positioned in a normal fashion with the speaker over the CI's microphone located behind the helix of the pinna. To simulate the same aural environment as the experimental task (see below), a free field white-noise generator was used during the control condition. Participants were instructed to report the number of auditory stimuli on a computer running a custom cognitive evaluation program on PsyScope software. The stimuli and procedure used for the experimental condition were identical to the one used previously (see Hotting & Röder, 2004). Participants seated in front of a computer, which was running a custom cognitive evaluation program, had their index finger placed on a tactile stimulator. Background noise (70 dB SPL) was generated using a free field white-noise generator in order to mask any auditory

hints emanating from the tactile stimulator. Tactile stimulations were delivered at a suprathreshold level for each participant using a bone conduction transducer (Madsen Electronics 03204, Otometrics, Taastrup, Denmark). Auditory stimulations were delivered via headphones using the same procedure describe earlier in the auditory pre-experimental condition. Ten trial types were presented twenty-five times in random order. Trials consisting of one tactile stimulus were paired with 0, 1, 2, 3, or 4 auditory stimuli (A0T1, A1T1, A2T1, A3T1, A4T1). Trials with two tactile stimuli were paired with 0, 1, or 2 auditory stimuli (A0T2, A1T2, A2T2). Trials of 3 and 4 tactile stimuli were paired with 0 or 1 auditory stimulus (A0T3, A1T3, A0T4, A1T4). Trials with two auditory and two tactile stimulations were used as filler trials. A total of 300 trial presentations were performed over five blocks of sixty random trial types. Trials consisted of short auditory stimulations (2100 Hz, duration: 10 ms) presented simultaneously with tactile stimulations (1000 Hz, duration: 50 ms). Auditory stimulations were delivered at intervals of 100 ms, while tactile stimulations were delivered at intervals of 200 ms. As per Hötting and Röder (2004), the first auditory stimulation preceded the first tactile stimulation by 25 ms. Participants were instructed to ignore auditory stimuli and report the number of tactile stimuli on the computer.

Results

Control conditions

The ability to accurately identify the correct number of auditory stimuli with no tactile stimuli present was similar across all groups (Fig. 1a). An analysis of variance with group (control; temporarily deaf) as a between-subjects factor and trial-type (A1T0; A2T0; A3T0; A4T0) as a

within-subjects factor was conducted. The analysis revealed that all groups were able to discriminate between differing numbers of auditory stimuli and that the main effect of the number of auditory stimuli was significant ($F(1, 28) = 1189.654, p < 0.001$). As expected, there was no main effect for groups ($F(1, 28) = 2.610, p = 0.117$) and the interaction between factors was not significant ($F(1, 28) = 1.874, p = 0.140$). The ability to accurately identify the correct number of tactile stimuli with no auditory stimuli present was also similar across all groups (Fig. 1b). An analysis of variance with group (control; temporarily deaf) as a between-subjects factor and trial-type (A0T1, A0T2, A0T3, A0T4) as a within-subjects factor was conducted. The analysis revealed that all groups were able to discriminate between differing numbers of tactile stimuli and that the main effect of the number of tactile stimuli was significant ($F(1, 28) = 2435.811, p < 0.001$). Again, there was no main effect for groups ($F(1, 28) = 0.020, p = 0.887$) and the interaction between factors was not significant ($F(1, 28) = 0.309, p = 0.819$).

Experimental conditions

Fig. 2 shows the average performance for the two groups subjected to one tactile stimulus with no auditory stimulus (A0T1) or one to four auditory stimuli (A1T1, A2T1, A3T1 and A4T1). The results show that the control group perceived an illusory audiotactile effect. Compared to the condition where the tactile stimulus was presented alone or simultaneously with one auditory stimulus (congruent conditions), members of the control group reported more tactile stimuli when more than one auditory stimuli were presented along with the tactile stimulus (incongruent audiotactile conditions).

All participants were clearly able to perceive the correct number of auditory-only stimuli presented (see pre-experimental auditory evaluation in the methods section), yet data shown in Fig. 2 suggests that temporarily deaf individuals were less predisposed to perceive a change in tactile perception compared to their matched controls. An analysis of variance with group (control; temporarily deaf individual) as a between-subjects factor and condition (A0T1, A1T1, A2T1, A3T1, A4T1) as a within-subjects factor was conducted in order to verify the latter assumption. Main effects of condition ($F(1, 28) = 10.649, p = 0.001$) and group ($F(1, 28) = 6.6061, p = 0.02$) were found. The interaction between factors was also significant ($F(1, 28) = 4.427, p = 0.002$). Post Hoc analysis revealed that the perceived changes in tactile perception varied significantly between groups, whether the tactile stimulus was presented along with two ($t(1, 28) = -3.268, p = 0.003$), three ($t(1, 28) = -2.106, p = 0.044$) or four ($t(1, 28) = -2.206, p = 0.036$) auditory stimuli.

The performance level of every temporarily deaf individual was examined further. This data revealed that only three deaf individuals were able to fuse auditory and tactile information at a low or relatively normal-level when the tactile stimulus was presented with two (mean perceived number of tactile stimuli: S4 = 1.36, S11 = 1.28, S13 = 1.40), three (mean perceived number of tactile stimuli: S4 = 2.24, S11 = 1.52, S13 = 1.32) or four (mean perceived number of tactile stimuli: S11 = 1.80, S13 = 1.32) auditory stimuli. All other participants perceived a maximum of 1.24 tactile stimuli in any of the fusion conditions. Individual performance was also examined in relation to the characteristics of hearing loss. We found no significant relationships ($p > 0.05$) between performance in the audiotactile task and the auditory performance (i.e. detection, discrimination or speech recognition ($r \leq 0.264$)), duration of deafness ($r = 0.388$),

length of experience since the recovery of auditory detection threshold ($r = -0.327$) and onset age of hearing loss ($r = 0.344$).

Discussion

The present study aims at examining the effects of temporary auditory deprivation on audiotactile integration. The experimental audiotactile task revealed a statistically significant difference between hearing individuals and temporarily deaf individuals. Hearing individuals' tactile sensations were influenced by auditory stimuli, whereas temporarily deaf individuals were not.

Because hearing was restored with the aid of a CI for all experimental group participants, it could be argued that these findings do not accurately represent post-temporary deafness multisensory integration per se, but only interaction capabilities following the use of this auditory prosthesis. However, several factors permit us to state that such an outcome cannot be explained merely by the use of the technological device. Audiometric evaluations confirmed that CIs transmit sounds within normal levels of intensity for all participants. Furthermore, task-irrelevant auditory and tactile capabilities were investigated to ensure that unisensory capabilities were equivalent amongst groups. Task-relevant unisensory abilities were also evaluated for both groups and no significant differences were found. All participants were clearly able to discriminate between the correct number of auditory and tactile stimuli in these control tasks. In other words, the very simple nature of the multisensory task (i.e. restricted to only basic, easily detectable, non-speech auditory and tactile stimuli presented at an individual comfortable level) suggests that the lack of integration reported here cannot be related to the use of the auditory device. Moreover, it should be noted that amongst deaf individuals, three participants were able to achieve a level of performance relatively close to that of the control group in the audiotactile

fusion conditions. These temporarily deaf participants, as opposed to the remaining twelve participants, clearly perceived two or more tactile stimulations in the three experimental conditions. These results indicate that the CI does not completely eliminate the possibility of fusion, thus confirming that the use of the technological device is not responsible for the lack of integration.

One could argue that these temporary deafness individuals are better than normal hearing because they can better filter out non-relevant noise from other sensory systems. In other words, the auditory stimuli, when asked to detect tactile stimuli, do not fool them. It could also be argued that temporary auditory deprivation led to an enhanced tactile ability. Indeed, enhanced tactile capabilities have been shown to explain an inability to fuse auditory and tactile information in certain cases. For instance, greater unisensory capabilities in the blind can lead to better audiotactile segregation capabilities (Hötting & Röder, 2004; Hötting & Röder, 2009; Champoux et al., 2011). Complementing such an assumption, imaging studies have revealed that tactile stimuli can activate auditory regions in deaf individuals (Levänen & Hamdorf, 2001; Schürmann, Caetano, Hlushchuk, Jousmäki, & Hari, 2006; Sharma, Gilley, Dorman, & Baldwin, 2007). Such plastic changes may lead to the enhanced tactile capabilities reported in profoundly deaf individuals (Levänen & Hamdorf, 2001; Heming & Brown, 2005). However, these changes might depend on a number of characteristics related to hearing loss (for a review, see Collignon, Champoux, Voss, & Lepore, 2011), as enhanced tactile capabilities are not found in other investigations using similar tactile tasks (Conway et al., 2011; Moallem, Reed, & Braida, 2010). Our tactile tasks did not reveal any significant differences between groups, suggesting that the lack of integration is not related to unisensory processing capabilities. The inability to fuse auditory and tactile stimuli appears to be solely a result of the sensory deprivation, supporting the

assertion that temporary deafness can have an impact on the development of multisensory processes.

The influence of tactile stimulation on auditory perception has often been suggested. It has been demonstrated that manual tactile perception may be altered by changes in sound perception (Hötting & Röder, 2004; Jousmäki & Hari, 1998; Zampini & Spence, 2004). This association between modalities suggests that auditory and tactile processing is not entirely independent. Recent neuroimaging studies have confirmed the link between auditory and tactile perception in humans, while electrophysiological recordings have demonstrated an early-stage neural interaction between auditory and somatosensory input in animals (Kayser & Logothetis, 2007; Soto-Faraco & Deco, 2009). Research in speech processing has also suggested the existence of an influence of tactile stimulation over auditory perception (Bernstein, Demorest, Coulter, & O'Connell, 1991; Gick & Dekle, 1991). The converse effect, that is the influence of auditory inputs on somatosensory perception, has also been exposed. For example, event-related potentials were observed over somatosensory areas following the presentation of auditory pure-tone stimuli (Foxe et al., 2000). The influence of auditory inputs on tactile sensation during speech production or perception has also been recently demonstrated (Champoux et al., 2011; Ito & Ostry, 2012). Considering that multisensory functions develop gradually and that they are influenced by early sensory experiences (e.g. Wallace et al., 2006; Wallace & Stein, 2007), it is conceivable that auditory privation from birth, even if temporary, could have a dramatic impact on the emergence and maturation of such important processes. The assumption of reduced multisensory capabilities following transient sensory privation is supported by the audiovisual integration results reported in children temporarily deprived of visual inputs at an early age (Putzar et al., 2007; Putzar et al., 2010). Our results with participants temporally deprived of

auditory information in an audiotactile task are also consistent with these findings. However, the data suggests that the interaction of the auditory system with the tactile modality might even be more readily impeded than the audiovisual process. Our results suggest that temporary auditory privation does not necessarily have to occur at birth to disrupt audiotactile integration in adults. These findings suggest that audiotactile processes might require an uninterrupted bond to develop and be maintained, as a temporary auditory privation in later life appears to also have a dramatic impact on audiotactile fusion capability.

No matter the basis for such discrepancy in the results between the control and the experimental group, these data highlight the importance of uninterrupted auditory stimulation to ensure normal multisensory integration function. Unlike audiovisual integration, for which a lack of integration seems infrequent and dependent on various features related to the hearing loss (e.g. Collignon et al., 2011), audiotactile integration appears to be disturbed for most following temporary deafness. The features responsible for normal or abnormal multisensory integration may still need to be investigated further, as the results from participants able to fuse auditory and tactile information had no commonality that set them apart from other temporarily deaf individuals.

Funding

This research was supported in part by the Natural Sciences and Engineering Research Council.

References

- Alary, F., Duquette, M., Goldstein, R., Elaine Chapman, C., Voss, P., La Buissonnière-Ariza, V., & Lepore, F. (2009). Tactile acuity in the blind: a closer look reveals superiority over the sighted in some but not all cutaneous tasks. *Neuropsychologia*, *47*, 2037–2043.
- Bell-Krotoski, J.A., & Tomancik, E. (1987). Repeatability of testing with the Semmes-Weinstein monofilaments. *Journal of Hand Surgery*, *12*, 155-161.
- Bernstein, L.E., Demorest, M.E., Coulter, D.C., & O'Connell, M.P. (1991). Lipreading sentences with vibrotactile vocoders: performance of normal-hearing and hearing-impaired subjects. *Journal of the Acoustical Society of America*, *90*, 2971-2984.
- Boscheinen-Morrin, J., & Conolly, W.B. (2001). *The hand : fundamentals of therapy*, Oxford : Butterworth-Heinemann.
- Bresciani, J.P., Ernst, M.O., Drewing, K., Bouyer, G., Maury, V., & Kheddar, A. (2005). Feeling what you hear: auditory signals can modulate tactile tap perception. *Experimental Brain Research*, *162*, 172-180.
- Champoux, F., Collignon, O., Bacon, B., Lepore, F., Zatorre, R.J., & Théoret, H. (2011). Early- and late-onset blindness both curb audiotactile integration on the parchment-skin illusion. *Psychological Science*, *22*, 19-25.
- Champoux, F., Lepore, F., Gagné, J.P., & Théoret, H. (2009). Visual stimuli can impair auditory processing in cochlear implant users. *Neuropsychologia*, *47*, 17-22.
- Collignon, O., Champoux, F., Voss, P., & Lepore, F. (2011). Sensory rehabilitation in the plastic brain. *Progress in Brain Research*, *191*, 211-231.
- Conway, C.M., Pisoni, D.B., Anaya, E.M., Karpicke, J., & Henning, S.C. (2011). Implicit sequence learning in deaf children with cochlear implants. *Developmental Science*, *14*, 69-82.

- Desai, S., Stickney, G., & Zeng, F.G. (2008). Auditory-visual speech perception in normal-hearing and cochlear-implant listeners. *Journal of the Acoustical Society of America*, *123*, 428-440.
- Drennan, W.R., & Rubinstein, J.T. (2008). Music perception in cochlear implant users and its relationship with psychophysical capabilities. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, *45*, 779-789.
- Foxe, J.J., Morocz, I.A., Murray, M.M., Higgins, B.A., Javitt, D.C., & Schroeder, C.E. (2000). Multisensory auditory-somatosensory interactions in early cortical processing revealed by high-density electrical mapping. *Brain Research. Cognitive Brain Research*, *10*, 77-83.
- Gick, B., & Derrick, D. (2009). Aero-tactile integration in speech perception. *Nature*, *462*, 502-504.
- Green, T., Katiri, S., Faulkner, A., & Rosen, S. (2007). Talker intelligibility differences in cochlear implant listeners. *Journal of the Acoustical Society of America*, *121*, EL223-EL229.
- Heming, J.E., & Brown, L.N. (2005). Sensory temporal processing in adults with early hearing loss. *Brain and Cognition*, *59*, 173-182.
- Hötting, K., Friedrich, C.K., & Röder, B. (2009). Neural correlates of cross-modally induced changes in tactile awareness. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *21*, 2445-2461.
- Hötting, K., & Röder, B. (2004). Hearing cheats touch, but less in congenitally blind than in sighted individuals. *Psychological Science*, *15*, 60-64.
- Hötting, K., & Röder, B. (2009). Auditory and auditory-tactile processing in congenitally blind humans. *Hearing Research*, *258*, 165-174.
- Ito, T., & Ostry, D.J. (2012). Speech sounds alter facial skin sensation. *Journal of Neuropsychology*, *107*, 442-447.

Jousmäki, V., & Hari, R. (1998). Parchment-skin illusion: sound-biased touch. *Current Biology*, 8, 190.

Kayser, C., & Logothetis, N.K. (2007). Do early sensory cortices integrate cross-modal information? *Brain Structure and Function*, 212, 121–132.

Landry, S., Bacon, B.A., Gilbert, C., Leybaert, J., Gagné, J.P., & Champoux, F. (2012). Sound recognition proficiency predicts audiovisual speech interactions in cochlear implant users. *PLoS One*, 7, e33113. doi:10.1371/journal.pone.0033113

Levänen, S., & Hamdorf, D. (2001). Feeling vibrations: enhanced tactile sensitivity in congenitally deaf humans. *Neuroscience Letters*, 301, 75-77.

McGurk, H. & MacDonald, J. (1976). Hearing lips and seeing voices. *Nature*, 264, 746-748.

Moallem, T.M., Reed, C.M., & Braida, L.D. (2010). Measures of tactual detection and temporal order resolution in congenitally deaf and normal-hearing adults. *Journal of the Acoustical Society of America*, 127, 3696-3709.

Ponton, C.W., Don, M., Eggermont, J.J., Waring, M.D., Kwong, B., & Masuda, A. (1996). Auditory system plasticity in children after periods of complete deafness. *Neuroreport*, 8, 61-65.

Putzar, L., Goerendt, I., Lange, K., Rösler, F., & Röder, B. (2007). Early visual deprivation impairs multisensory interactions in humans. *Nature Neuroscience*, 10, 1243-1245.

Putzar, L., Hötting, K., & Röder, B. (2010). Early visual deprivation affects the development of face recognition and of audio-visual speech perception. *Restorative Neurology and Neuroscience*, 28, 251-257.

Rouger, J., Fraysse, B., Deguine, O., & Barone, P. (2008). McGurk effect in cochlear-implanted deaf subjects. *Brain Research*, 1188, 87-99.

- Rouger, J., Lagleyre, S., Fraysse, B., Deneve, S., Deguine, O., & Barone, P. (2007). Evidence that cochlear-implanted deaf patients are better multisensory integrators. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *104*, 7295-7300.
- Schorr, E.A., Fox, N.A., Wassenhove, V., & Knudsen, E.I. (2005). Auditory-visual fusion in speech perception in children with cochlear implants. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *102*, 18748-18750.
- Schürmann, M., Caetano, G., Hlushchuk, Y., Jousmäki, V., & Hari, R. (2006). Touch activates human auditory cortex. *Neuroimage*, *30*, 1325-1331.
- Schwartz, J.L. (2010). A reanalysis of McGurk data suggests that audiovisual fusion in speech perception is subject-dependent. *Journal of the Acoustical Society of America*, *127*, 1584-1594.
- Sharma, A., Gilley, P.M., Dorman, M.F., & Baldwin, R. (2007). Deprivation-induced cortical reorganization in children with cochlear implants. *International Journal of Audiology*, *46*, 494-499.
- Soto-Faraco, S., & Deco, G. (2009). Multisensory contributions to the perception of vibrotactile events. *Behavioural Brain Research*, *196*, 145-154.
- Tremblay, C., Champoux, F., Lepore, F., & Théoret, H. (2010). Audiovisual fusion and cochlear implant proficiency. *Restorative Neurology and Neuroscience*, *28*, 283-291.
- Van Boven, R.W., & Johnson, K.O. (1994). A psychophysical study of the mechanisms of sensory recovery following nerve injury in humans. *Brain*, *117*, 149-167.
- Wallace, M.T., Carriere, B.N., Perrault, T.J. Jr., Vaughan, J.W., & Stein, B.E. (2006). The development of cortical multisensory integration. *The Journal of Neuroscience*, *26*, 11844-11849.

Wallace, M.T., & Stein, B.E. (2007). Early experience determines how the senses will interact. *Journal of Neurophysiology*, 97, 921-926.

Zampini, M., & Spence, C. (2004). The role of auditory cues in modulating the perceived crispness and staleness of potato chips. *Journal of Sensory Studies*, 19, 347-363.

Table*Table 1. Clinical profile of temporarily deaf participants*

Subject	Sex	Age	Age at onset of deafness (years)	Cause of deafness	Deafness duration (years)	Auditory detection recovery (years)	Speech recognition (%)
S1	F	37	0 (sudden)	Unknown	30	8	20
S2	F	36	12-26 (progressive)	Unknown	14	9	78
S3	F	63	7-11 (progressive)	Hereditary	25	8	54
S4	F	56	16-50 (progressive)	Hereditary	34	5	92
S5	F	58	0 (sudden)	Hereditary	53	5	20
S6	M	40	7-35 (progressive)	Unknown	30	3	90
S7	M	22	0 (sudden)	Unknown	18	4	80
S8	F	35	0 (sudden)	Hereditary	31	4	82
S9	F	49	17-38 (progressive)	Hereditary	21	3	76
S10	F	32	0-14 (progressive)	Hereditary	14	4	84
S11	F	44	0 (sudden)	Hereditary	38	6	56
S12	F	57	0-52 (progressive)	Hereditary	52	5	72
S13	F	65	16-62 (progressive)	Hereditary	46	3	76
S14	M	24	0 (sudden)	Hereditary	13	9	2
S15	M	57	10-33 (progressive)	Ototoxic	42	5	84

Figure Legend

Fig. 1. Mean number of auditory stimuli perceived when 1, 2, 3 or 4 auditory stimuli were presented with no tactile stimuli (A). Mean number of tactile stimuli (with standard error bars) perceived when 1, 2, 3 or 4 tactile stimuli were presented with no auditory stimuli (B). These control conditions revealed that auditory and tactile discrimination capabilities were similar across groups.

Fig. 2. Mean number of tactile stimuli perceived as a function of number of accompanying auditory stimuli when only one tactile stimulus was presented. An asterisk indicates a significant difference between groups.

Figure 1.

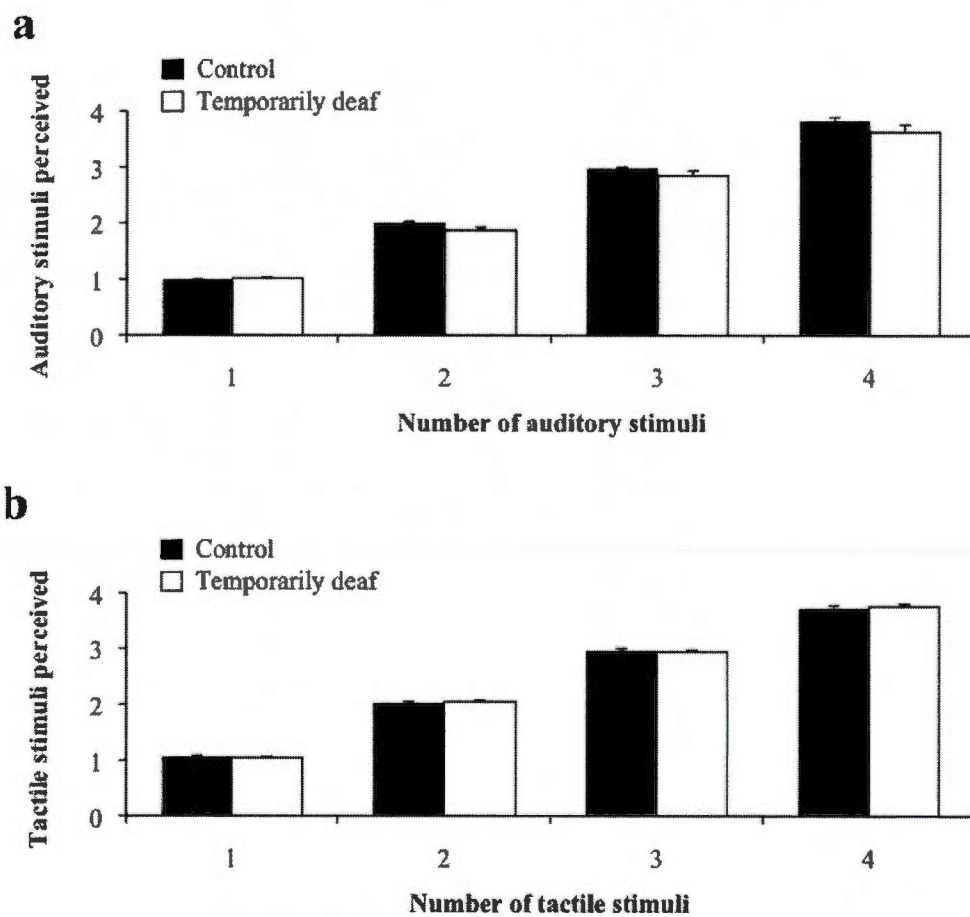
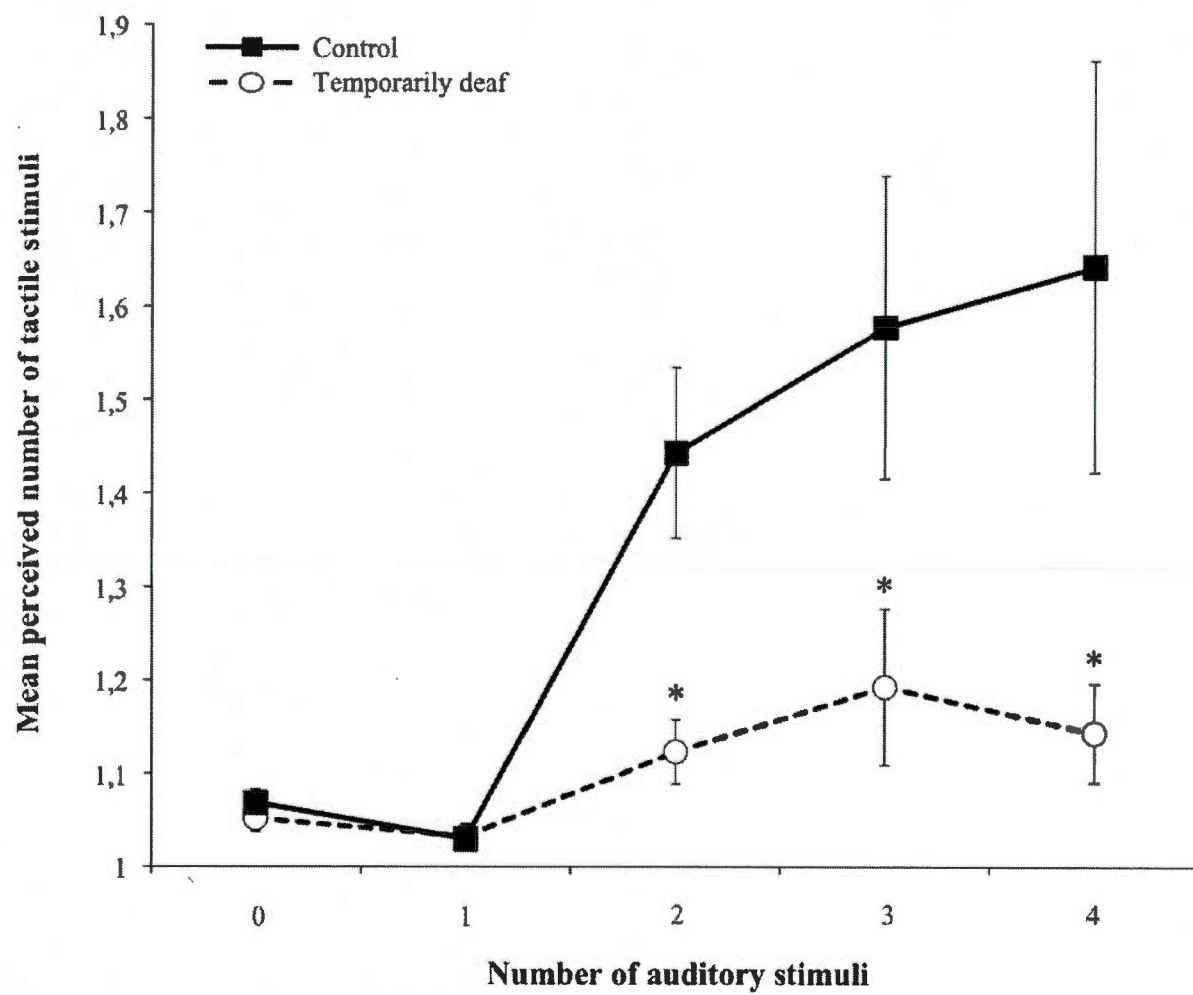


Figure 2.



CHAPITRE III

DISCUSSION

Le but de ce projet de recherche est de déterminer la présence d'interaction entre les modalités tactiles et auditives chez l'individu sourd porteur de l'implant cochléaire. Pour ce faire, la tâche de « l'effet de l'éclair illusoire audiotactile » est utilisée afin de déterminer les capacités d'intégration audiotactile chez des personnes ayant une audition normale et chez les individus sourds porteurs de l'implant cochléaire.

Les habiletés unisensorielles chez les porteurs de l'implant cochléaire

Les résultats obtenus lors des tâches contrôles montrent que les capacités unisensorielles (c'est-à-dire tactile et auditive) sont équivalente chez le groupe contrôle et le groupe d'individus porteurs de l'implant cochléaire.

Avant d'accomplir la tâche expérimentale multisensorielle, la sensibilité tactile est évaluée chez les participants du groupe témoin et chez les participants porteurs de l'implant cochléaire. Pour ce faire, une tâche de discrimination d'orientation tactile, de détection tactile, de discrimination vibrotactile et d'acuité tactile est utilisée (voir Annexe B pour une schématisation des méthodes d'évaluations tactiles utilisées).

La capacité de détection tactile sur l'index a été mesurée à l'aide d'une série d'aesthésiomètres Semmes-Weinstein exerçant une pression constante (Bell-Krotoski & Tomancik, 1987). La détection d'une pression de 0.05 g représente une capacité de détection tactile normale. Ce niveau de détection est atteint chez tous les sujets du groupe témoin et chez tous les porteurs de l'implant cochléaire.

La capacité de discrimination tactile sur l'index est mesurée lors d'une tâche de discrimination spatiale d'orientation (Van Boven & Johnson, 1994). Cette tâche fournit une mesure unisensorielle afin de comparer les capacités tactiles inter-groupes. Le seuil de discrimination spatiale d'orientation tactile est définie comme étant a largeur inter-ligne qui permet d'atteindre un niveau de performance de 75% de réussite. Lors de cette tâche tactile, les résultats ne montrent aucune différence significative entre les sujets témoins et les sujets porteurs de l'implant cochléaire.

L'habileté à discriminer les fréquences vibratoires au niveau de l'index est déterminée lors d'une tâche de discrimination de fréquences vibrotactiles (Alary, Duquette, Goldstein, Elaine Chapman, Voss, La Buissonnière-Ariza, & Lepore, 2009). Cette tâche fournit une mesure unisensorielle permettant de comparer les capacités

tactiles inter-groupes. Aucune différence significative n'est observée entre le groupe témoin et le groupe de sujets porteurs de l'implant cochléaire.

L'acuité spatiale tactile de la phalange distale de l'index droit est évaluée lors d'une tâche de détection de deux points (Boscheinen-Morrin & Conolly, 1994). Cette tâche fournit une mesure unisensorielle de la résolution spatiale tactile chez les participants. Chaque participant retenu doit être capable de détecter correctement le nombre de points de contact lors de 70% des présentations ($n = 10$). Ce niveau de détection est atteint chez tous les membres du groupe témoin et chez tous les porteurs de l'implant cochléaire.

La sensibilité auditive est évaluée chez les membres du groupe témoin et chez les individus porteurs de l'implant cochléaire à l'aide d'un examen audiométrique. Le seuil de détection des différents sons purs en dB HL varie par pas d'une octave (250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz). Chaque son ($n = 5$) est présenté de manière ascendante/descendante (Harrell, 2002). L'examen audiométrique permet de s'assurer que les seuils de détection sonore se situent dans les limites de la normale chez les membres du groupe témoin et tous les participants porteurs de l'implant cochléaire. Tous les membres du groupe témoin et tous les participants porteurs de l'implant cochléaire ont une audition dans les limites de la normale. C'est-à-dire, une capacité de détection des fréquences présentées à une intensité maximale de 25 dB HL (Clark, 1981).

En résumé, aucune différence significative n'est retrouvée lors des tâches de discrimination spatiale d'orientation tactile, du seuil de détection tactile, de la discrimination vibrotactile et de l'acuité tactile. De plus, les participants des deux groupes ont des seuils de détection auditifs dans les limites de la normale.

L'intégration audiotactile chez les porteurs de l'implant cochléaire

Malgré des capacités de détection et de discrimination unisensorielles identiques, des différences significatives sont observables entre les sujets du groupe témoin et les sujets porteurs de l'implant cochléaire lors de la tâche expérimentale lorsque le nombre de stimulations auditives n'est pas identique au nombre de stimulations tactiles. Comme dans les recherches précédentes utilisant cette même tâche (Hötting & Röder, 2004), la

présence de stimulations auditives a une influence sur le nombre de stimulations tactiles perçues par les sujets du groupe témoin. Cependant, les sujets du groupe porteurs de l'implant cochléaire ne démontrent pas une telle intégration des stimulations auditives et tactiles. Les analyses statistiques post hoc montrent une différence significative entre le nombre de stimulations tactiles perçues par les sujets des deux groupes lors d'une stimulation tactile présentée avec deux, trois et quatre stimulations auditives.

Tel que décrit dans le chapitre précédent, l'analyse des résultats individuels montre que seulement trois individus porteurs de l'implant cochléaire sont capables d'intégrer l'information auditive et tactile comme les sujets du groupe contrôle lorsque les stimuli tactiles sont accompagnés de deux, trois ou quatre stimulations auditives. Tous les autres sujets porteurs de l'implant cochléaire ($n = 12$) ne rapportent percevoir qu'une seule stimulation tactile lorsque celle-ci est accompagnée de plusieurs stimulations auditives.

Les résultats des porteurs d'implant cochléaire lors de la tâche audiotactile sont aussi analysés en fonction des caractéristiques de la perte auditive. Ceux-ci ne montrent aucune relation entre les résultats obtenus à la tâche illusoire audiotactile et la performance auditive à l'aide de l'implant cochléaire lors une tâche d'identification de la parole (Benfante, Charbonneau, Arseneault, Zinger, Marti, & Champoux, 1966) (voir tableau 1 pour les résultats de la tâche d'identification de la parole). De même, il n'y a pas de relation entre la performance audiotactile et la durée de la surdité, l'âge lors de la perte auditive ou la durée du port de l'implant cochléaire.

En résumé, les résultats confirment l'hypothèse que les porteurs de l'implant cochléaire ont des résultats inférieurs à ceux des sujets du groupe témoin ayant une audition normale lors de la tâche d'intégration audiotactile. Par contre, les résultats infirment l'hypothèse d'une relation entre la performance auditive à l'aide de l'implant cochléaire et les capacités d'intégration audiotactile chez les participants porteurs de l'implant cochléaire.

Interprétation des résultats

L'intégration multisensorielle est principalement étudiée chez les porteurs de l'implant cochléaire en modalité audiovisuelle. Les résultats montrent que les porteurs d'implant cochléaire ont des capacités d'intégration audiovisuelle de la parole moins élevées que les personnes ayant une audition normale (Schorr et coll., 2005; Rouger et coll., 2008; Champoux et coll., 2011; Landry et coll., 2012). Ces résultats suggèrent qu'une privation auditive, même temporaire, peut avoir un impact sur le développement de l'ensemble des capacités d'intégration multisensorielle chez l'humain (Rouger et coll., 2007). Cependant, à cause de la spécificité des tâches utilisées, il est impossible de confirmer les effets d'une privation auditive sur l'ensemble des capacités d'intégration multisensorielle chez les porteurs d'implant cochléaire. En effet, les résultats de Schwartz (2010) démontrent que dans le cadre de l'intégration audiovisuelle de la parole, il est difficile de déterminer si les résultats obtenus sont dus au manque d'intégration audiovisuelle ou aux difficultés de perception auditives. Avant de pouvoir confirmer l'hypothèse émise par Rouger et coll. (2007) que les porteurs d'implants cochléaires sont meilleurs intégrateurs multisensorielles, ces capacités doivent être examinées lors de tâches n'utilisant pas de stimuli vocaux et examinant les capacités d'interaction de modalités sensorielles différentes. La présente recherche révèle un déficit d'intégration audiotactile chez les porteurs d'implant cochléaire dans une tâche utilisant des stimuli auditifs et tactiles élémentaires. Les résultats, de la présente étude et ceux des études d'intégration audiovisuelle de la parole chez cette population, confirment qu'une privation auditive, même temporaire, perturbe le développement des capacités d'intégration multisensorielle.

La privation visuelle engendre une augmentation des habilités tactiles chez les personnes aveugles (Van Boven, Hamilton, Kauffman, Keenan, & Pascual-Leone, 2000). Certains chercheurs suggèrent que ces habilités tactiles supérieures permettent d'expliquer l'absence d'intégration audiotactile chez les individus aveugles; une capacité tactile supérieure permettant une meilleure ségrégation de l'information provenant des deux modalités. (Hötting & Röder, 2004; Champoux et coll., 2011). Chez l'individu sourd, plusieurs études en imagerie cérébrale montrent que les stimuli tactiles peuvent activer les aires auditives (MEG : Levänen & Hamdork, 2001; IRMf : Schürmann,

Caetano, Hlushchuk, Jousmäki & Hari, 2006; EEG et MEG : Sharma et coll., 2007). Certaines données comportementales suggèrent aussi que cette réorganisation cérébrale peut mener à des habiletés tactiles supérieures chez l'individu sourd (Heming & Brown, 2005; Levänen & Hamdork, 2001; Schiff & Dytell, 1972). Par conséquent, un manque d'intégration multisensorielle peut être expliqué par une habileté tactile supérieure chez l'individu sourd. Même si ces données n'ont jamais été rapportées chez les personnes sourdes porteuses de l'implant cochléaire, des données comportementales suggèrent que les personnes sourdes n'ont pas de capacités tactiles supérieures (Conway, Pisoni, Anaya, Karpicke & Henning, 2011; Moallem, Reed & Braida, 2010). Nos données chez les porteurs de l'implant cochléaire sont en accord avec ces derniers résultats. En effet, nos résultats lors des multiples tâches unisensorielles ne révèlent aucune différence significative entre les résultats des sujets du groupe contrôle et ceux des sujets sourds porteurs de l'implant cochléaire. Les résultats dans les tâches auditives et tactiles suggèrent ainsi que l'incapacité de fusionner les informations tactiles et auditives n'est pas liée à une augmentation des capacités unisensorielles. Par conséquent, le manque d'intégration multisensorielle observé semble essentiellement dû à la perte auditive chez les porteurs de l'implant cochléaire.

Ces résultats suggèrent qu'une perte auditive, même temporaire, peut avoir un impact majeur sur les capacités d'intégration audiotactile. Les capacités multisensorielles se développent graduellement et sont influencées par les expériences sensorielles (Wallace, Carriere, Perrault, Vaughan & Stein, 2006; Wallace & Stein, 2007). Il est donc concevable qu'une privation auditive à un jeune âge aie un impact considérable sur l'émergence et la maturation de ce processus. Les résultats des études examinant les performances audiovisuelles chez les personnes privées temporairement de vision à la naissance sont en accord avec cette hypothèse (Putzar et coll., 2007). Les résultats de la présente étude, effectuée chez des personnes privées temporairement d'audition, sont aussi en accord avec cette hypothèse. Cependant, nos résultats ne permettent pas de suggérer que le moment d'occurrence de la perte auditive est une variable critique lors du développement des processus d'intégration audiotactile. En

effet, les résultats révèlent des difficultés d'intégration chez les personnes atteintes de surdité que celle-ci survienne à la naissance ou à l'âge adulte.

Plusieurs pistes de recherche suggèrent que le manque d'intégration d'informations audiotactiles temporelles observé n'est pas relié à l'utilisation de l'implant cochléaire. Cependant, aucune relation ne peut être établie entre les résultats des porteurs de l'implant cochléaire capables d'intégration multisensorielle et les résultats de ceux qui sont incapables de fusionner l'information auditive et tactile. Par ailleurs, nos résultats confirment que l'utilisation de l'implant cochléaire n'est pas responsable de la mauvaise intégration observée chez la plupart des sujets, mais ils ne permettent pas d'isoler les variables responsables de cette performance.

CONCLUSION

Ce mémoire nous a permis d'étudier l'effet d'une privation auditive sur la capacité d'intégration de l'information auditive et tactile. Les résultats suggèrent que les personnes sourdes porteuses de l'implant cochléaire sont incapables d'intégrer l'information audiotactile. Ces résultats indiquent qu'une surdité temporaire a des effets sur les processus d'intégration audiotactile similaire à ceux précédemment observés lors de l'intégration d'information audiovisuelle.

ANNEXE

Résultats préliminaires lors de la tâche de « l'effet de la peau parcheminée »

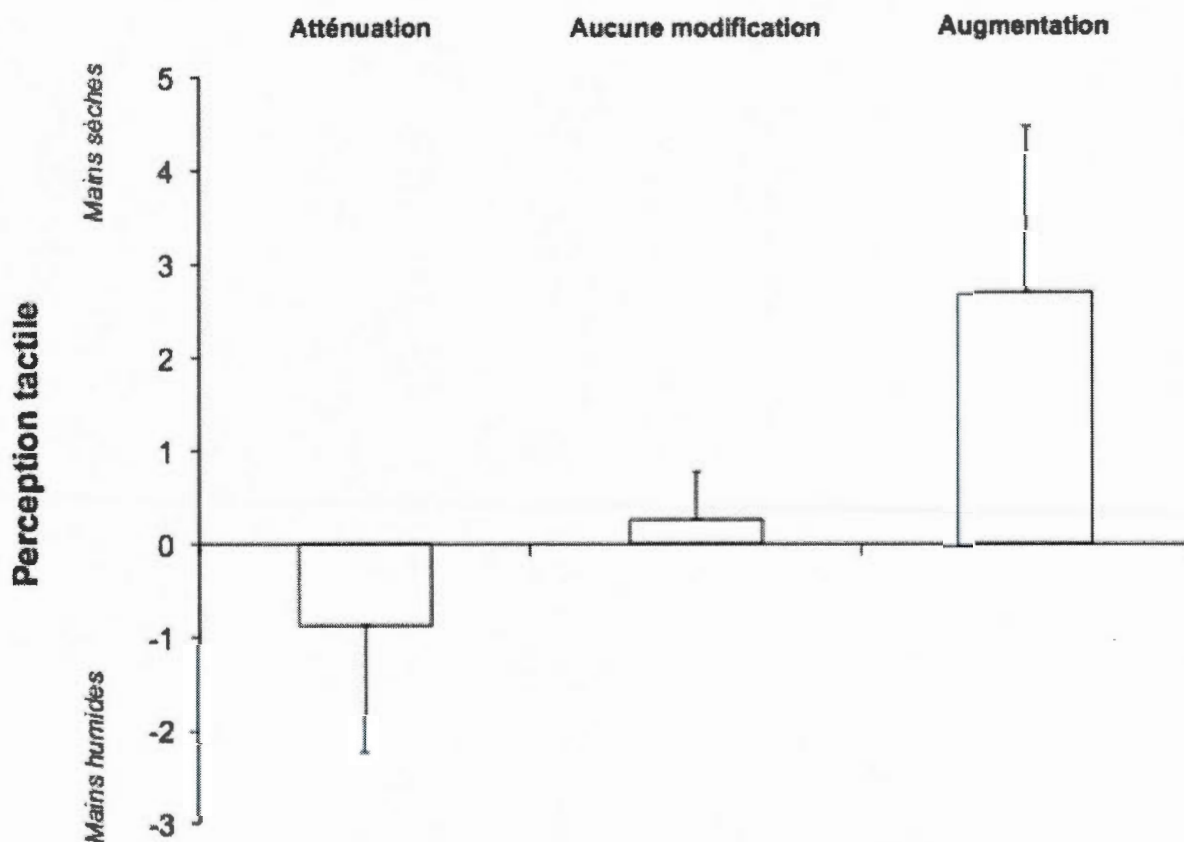
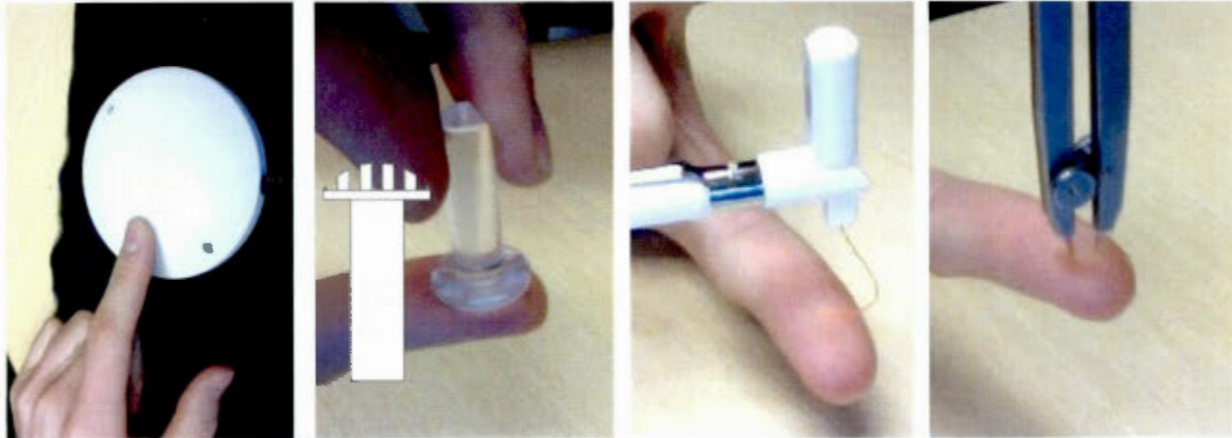


Figure 4: Résultats préliminaires lors de la tâche de « l'effet de la peau parcheminée ». Moyenne des réponses et écarts-types de 15 participants ayant une audition normale, âgés de 22 à 65 ans (4 hommes et 11 femmes; moyenne d'âge: 45 ans) lors d'une évaluation des capacités d'intégration audiotactile à l'aide de la tâche de « l'effet de la peau parcheminée ». La même méthode que celle utilisée précédemment dans notre laboratoire est utilisée (pour plus de détails, voir Champoux et coll., 2011). La majorité des sujets peuvent identifier correctement la sensation palmaire normale (condition sans modification). En effet, la perception tactile rapportée pour la condition contrôle avoisine 0 chez tous les sujets. Les participants indiquent un changement de sensation tactile lorsque les hautes fréquences sont atténuées (à gauche) ou augmentées (à droite). Ces changements sont conformes aux résultats de Jousmaki et Hari (1998) et Champoux et coll. (2011). La sensation palmaire des participants est plus sèche lors de la condition ayant une augmentation des hautes fréquences (à droite) et plus humide dans la condition ayant une atténuation des hautes fréquences (à gauche). Cependant, on retrouve une très grande variabilité dans les résultats.

Tâches tactiles unisensorielles



A. Discrimination de fréquences vibrotactiles

B. Discrimination spatiale d'orientation tactile

C. Détection tactile

D. Acuité tactile

Figure 5 : Stimuli utilisés lors des tâches tactiles. A. Deux vibrations ayant des fréquences différentes sont appliquées séquentiellement avec une intensité supraliminaire sur l'index de la main droite. Le sujet doit indiquer si la fréquence des deux vibrations est similaire. B. Un dôme est appliqué manuellement sur l'index droit et le sujet doit indiquer l'orientation des rainures (perpendiculaire ou parallèle). C. L'index de la main droite est stimulé avec un poil de Von Frey. Le sujet doit indiquer s'il perçoit la pression exercée lors d'une stimulation. D. La pulpe de l'index de la main droite du sujet est stimulée avec les deux pointes d'un aesthésiomètre. Le sujet doit indiquer s'il perçoit un point de contact ou deux points de contact sur son index.

BIBLIOGRAPHIE

- Alary, F., Duquette, M., Goldstein, R., Elaine Chapman, C., Voss, P., La Buissonnière-Ariza, V. & Lepore, F. (2009). Tactile acuity in the blind: a closer look reveals superiority over the sighted in some but not all cutaneous tasks. *Neuropsychologia*, 47, 2037–2043.
- Armstrong, B. A., Neville, H. J., Hillyard, S. A. & Mitchell, T. V. (2002). Auditory deprivation affects processing of motion, but not color. *Cognitive Brain Research*, 14, 422-434.
- Batteau, D.W. (1967). The role of the pinna in human localization. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 168, 158-180.
- Bazwinsky, I., Hilbig, H., Bidmon, H.-J. & RübSamen, R. (2003). Characterization of the human superior olivary complex by calcium binding proteins and neurofilament H (SMI-32). *The Journal of Comparative Neurology*, 456, 292-303.
- Bell-Krotoski, J.A. (1990). Light touch-deep pressure testing using Semmes-Weinstein monofilaments. Dans Hunter J.M., Schneider L.H., Mackin E.J. & Callahan A.D., (Éds), *Rehabilitation of the hand: surgery and therapy*, (3^e ed) (pp. 585-593). St. Louis : Mosby.
- Bell-Krotoski, J.A. & Tomancik, E. (1987). Repeatability of testing with the Semmes-Weinstein monofilaments. *Journal of Hand Surgery*, 12, 155-161.
- Benfante, H., Charbonneau, R., Arseneault, A., Zinger, A., Marti, A., & Champoux, N. (1966). *Audiometrie vocale*. Montreal: Hopital Maisonneuve.

- Berglund, A.M. & Ryugo, D.K. (1987). Hair cell innervation by spiral ganglion neurons in the mouse. *The Journal of Comparative Neurology*, 255, 560-570.
- Boscheinen-Morrin, J. & Conolly, W.B. (2001). *The Hand : Fundamentals of therapy* (3^e éd). Oxford : Butterworth-Heinemann.
- Bresciani, J.-P., Ernest, M. O., Drewing, K., Bouyer, G., Maury, V. & Kheddar, A. (2005). Feeling what you hear : auditory signals can modulate tactile tap perception. *Experimental Brain Research*, 162, 172-180.
- Campanella, S. & Belin, P. (2007). Integrating face and voice in person perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 11, 535-543.
- Cant, N.B. & Casseday J.H. (1986). Projections from the anteroventral cochlear nucleus to the lateral and medial superior olivary nuclei. *The Journal of Comparative Neurology*, 247, 457-476.
- Champoux, F., Collignon, O., Bacon, B., Lepore, F., Zatorre, R.J. & Théoret, H. (2011). Early- and late-onset blindness both curb audiotactile integration on the parchment-skin illusion. *Psychological Science*, 22, 19-25.
- Champoux, F., Lepore, F., Gagné, J.-P. & Théoret, H. (2009). Visual stimuli can impair auditory processing in cochlear implant users. *Neuropsychologia*, 47, 17-22.
- Clark, J.G. (1981). Uses and abuses of hearing loss classification. *American Speech-Language-Hearing Association*, 23, 493-500.
- Conway, C.M., Pisoni, D.B., Anaya, E.M., Karpicke, J. & Henning, S.C. (2011). Implicit sequence Learning in deaf children with cochlear implants. *Developmental Science*, 14, 69-82.

- Coulter, J.D. (1974). Sensory transmission through lemniscal pathway during voluntary movement in the cat. *Journal of Neurophysiology*, 37, 831-845.
- Desai, S., Stickney, G. & Zeng, F.-G. (2008). Auditory-visual speech perception in normal-hearing and cochlear-implant listeners. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123, 428-440.
- Doucet, M., Bergeron, F., Lassonde, M., Ferron, P. & Lepore, F. (2006). Cross-modal reorganization and speech perception in cochlear implant users. *Brain*, 129, 3376-3383.
- Eggermont, J.J., Ponton, C.W., Don, M., Waring, M.D. & Kwong, B. (1997). Maturation delays in cortical evoked potentials in cochlear implant users. *Acta Oto-Laryngology*, 117, 161-163.
- Facchini, S. & Anloti, S.M. (2003). Short term light deprivation increases tactile spatial acuity in humans. *Neurology*, 60, 1998-1999.
- Fan-Gang, Z., Rebscher, S., Harrison, W., Xiaoan, S. & Haihong, F. (2008). Cochlear implants: System design, integration, and evaluation. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, 1, 115-142.
- Finney, E., Fine, I. & Dobkins, K. (2001). Visual stimuli activate auditory cortex in the deaf. *Nature Neuroscience*, 4, 1171-1173.
- Foxe, J.J. (2009). Multisensory integration: Frequency tuning of audio-tactile integration. *Current Biology*, 19, 373-375.
- Foxe, J.J., Morocz, A.I., Murray, M.M., Higgins, B.A., Javitt, D.C. & Schroeder, C.E. (2000). Multisensory auditory-somatosensory interactions in early cortical processing revealed by high-density electrical mapping. *Cognitive Brain*

Research, 10, 77–83.

Foxe, J. J., Wylie, G., Martinez, A., Schroeder, C., Javitt, D., Guilfoyle, D., ... Murray, M. (2002). Auditory-somatosensory multisensory processing in auditory association cortex: an fMRI study. *Journal of Neurophysiology*, 88, 540–543.

Gescheider, G.A. (1997). *Psychophysics: the fundamentals*, (3e ed). Mahwah : Lawrence Erlbaum Associates.

Gescheider, G.A. & Niblette, R.K. (1967). Cross-modality masking for touch and hearing. *Journal of Experimental Psychology*, 74, 313–20.

Gescheider, G.A., Bolanowski, S.J., Hall, K.L., Hoffman, K.E. & Verrillo, R.T. (1994). The effects of aging on information-processing channels in the sense of touch: I. Absolute sensitivity. *Somatosensory & Motor Research*, 11, 345-357.

Gick, B. & Derrick, D. (2009). Aero-tactile integration in speech perception. *Nature*, 462, 502-504.

Gilman, S. (2002). Joint position sense and vibration sense: Anatomical organisation and assessment. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 73, 473.

Giraud, A. & Lee, H. (2007). Predicting cochlear implant outcome from brain organisation in the deaf. *Restorative Neurology and Neuroscience*, 25, 381-390.

Giray, M. & Ulrich, R. (1993). Motor coactivation revealed by response force in divided and focused attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 19, 1278-1291.

Gobbelé, R., Schürmann, M., Forss, N., Juottonen, K., Buchner, H. & Hari, R. (2003).

Activation of the human posterior parietal and temporoparietal cortices during audiotactile interaction. *NeuroImage*, 20, 503–511.

Gordon, G. & Grant, G. (1982). Dorsolateral spinal afferents to some medullary sensory nuclei. *Experimental Brain Research*, 46, 12-23.

Green, A.M. & Angelaki, D.E. (2010). Multisensory integration: Resolving sensory ambiguities to build novel representations. *Current Opinion in Neurobiology*, 20, 353-360.

Grothe, B., Schweizer, H., Pollak, G.D., Shuller, G. & Rosemann, C. (1994). Anatomy and Projection Patterns of the Superior Olivary Complex in the Mexican Free-Tailed Bat, *Tadarida brasiliensis mexicana*. *The Journal of Comparative Neurology*, 343, 630-646.

Hage, J.J., Van Der Steen, L.P.E. & Der Groot, P.J.M. (1995). Difference in sensibility between the dominant and nondominant index finger as tested using the Semmes-Weinstein monofilaments pressure aesthesiometer. *Journal of Hand Surgery*, 20, 227-229.

Harrel, R.W. (2001). Puretone Evaluation. Dans J. Katz (Eds), *Handbook of Clinical Audiology*, (5e éd) (pp. 71-87). Baltimore : Williams and Wilkins.

Helfert, R.H. & Aschoff, A. (1997). Superior olivary complex and nuclei of the lateral lemniscus. Dans Ehret, G. & Romand, R. (Eds). *The central auditory system* (pp. 193-258). New York : Oxford University Press.

Hemin, J.R. & Brown, L.N. (2005). Sensory temporal processing in adults with early hearing loss. *Brain and Cognition*, 59, 173-182.

Hikosaka, K., Iwai, E., Saito, H. & Tanaka, K. (1988). Polysensory properties of neurons

in the anterior bank of the caudal superior temporal sulcus of the macaque monkey. *Journal of Neurophysiology*, 60, 1615–1637.

Hirano, S., Naito, Y., Kojima, H., Honjo, I., Inoue, M., Shoji, K., ... Konishi, J. (2000). Functional differentiation of the auditory association area in prelingually deaf subjects. *Auris Nasus Larynx*, 27, 303-310.

Hötting, K. & Röder, B. (2004). Hearing cheats touch, but less in congenitally blind than in sighted individuals. *Psychological Science*, 15, 60-64.

Hötting, K. & Röder, B. (2009). Auditory and auditory-tactile processing in congenitally blind humans. *Hearing Research*, 258, 165-174.

Hyvärinen, J. & Poranen, A. (1974). Function of the parietal associative area 7 as revealed from cellular discharges in alert monkeys. *Brain*, 97, 673–692.

Iggo, A. (1982). Cutaneous sensory mechanisms. Dans Barlow, H.B. & Mollon, J.D. (Éds), (pp. 369-408). *The Senses*. Cambridge: Cambridge University Press.

Iggo, A. & Andres, H.K. (1982). Morphology of cutaneous receptors. *Annual Review of Neuroscience*, 5, 1-31.

Ito, T., Tiede, M. & Ostry, D. J. (2009). Somatosensory function in speech perception. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106, 1245-1248.

Johansson, R.S. & Vallbo, A.B. (1983). Tactile sensory coding in the glabrous skin of the human hand. *Trends in Neuroscience*, 6, 27-32.

- Johnson, K.O. & Phillips, J.R. (1981). Tactile spatial resolution. I. Two-point discrimination, gap detection, grating resolution, and letter recognition. *Journal of Neurophysiology*, 46, 1177-1191.
- Jousmäki, V. & Hari, R. (1998). Parchment-skin illusion : Sound-biased touch. *Current Biology*, 8, 190.
- Kaas, J.H. (2004). Evolution of somatosensory and motor cortex in primates. *The Anatomical Record. Part A, Discoveries in Molecular, Cellular, and Evolutionary Biology*, 281, 1148-1156.
- Kenshalo, D.R. Jr., Giesler, G.L. Jr., Leonard, R.B., & Willis, W.D. (1980). Responses of neurons in primate ventral posterior lateral nucleus to noxious stimuli. *Journal of Neurophysiology*, 43, 1594-1614.
- Kidd, S.A. & Kelly, J.B. (1996). Contribution of the Dorsal Nucleus of the Lateral Lemniscus to Binaural Responses in the Inferior Colliculus of the Rat: Interaural Time Delays. *The Journal of Neuroscience*, 16, 7390-7397.
- Kisilevsky, B.S. (1995). The influence of stimulus and subject variables on human fetal responses to sound and vibration. In J.-P. Lecanuet, W.P. Fifer, N.A. Krasnegor & W.P. Smotherman (Eds), *Fetal development : A psychological perspective* (pp. 263-278). Hillsdale : Erlbaum.
- Kisilevsky, B.S. & Muir, D.W. (1991). Human fetal and subsequent newborn responses to sound and vibration. *Infant Behavior and Development*, 14, 1-26.
- Kurokawa, H. & Goode, R.L. (1995). Sound pressure gain produced by the human middle ear. *Otolaryngology-Head and Neck Surgery*, 113, 349-355.

- Lakatos, P., Chen, C.-M., O'Connell, M.N., Mills, A. & Schroeder, C.E. (2007). Neuronal oscillations and multisensory interaction in primary auditory cortex. *Neuron*, *53*, 271-292.
- Landry, S., Bacon, B.A., Gilbert, C., Leybaert, J., Gagné, J.P. & Champoux, F. (2012). Sound recognition proficiency predicts audiovisual speech interactions in cochlear implant users. *PLoS One*, *7*, e33113.
- Laudau, M.E. & Barner, K.C. (2009). Vestibulocochlear nerve. *Seminars in Neurology*, *29*, 66-73.
- Laurienti, P.J., Kraft, R.A., Maldjian, J.A., Burdette, J.H. & Wallace, M.T. (2004). Semantic congruence is a critical factor in multisensory behavioral performance. *Experimental Brain Research*, *158*, 405-414.
- Le Gros Clark, W.E. (1932). The structure and connections of the thalamus. *Brain*, *55*, 406-470.
- LeDoux, J.E., Ruggiero, D.A. & Reis, D.J. (1985). Projections to the subcortical forebrain from anatomically defined regions of the medial geniculate body in the rat. *The Journal of Comparative Neurology*, *242*, 182-213.
- Lee, D., Lee, J., Oh, S., Kim, S., Kim, J., Chung, J., ... Kim, C.S. (2001). Deafness: Cross-modal plasticity and cochlear implants. *Nature*, *409*, 149-150.
- Leinonen, L. & Nyman, G. (1979). Functional properties of cells in anterolateral part of area 7 associative face area of awake monkeys. *Experimental Brain Research*, *34*, 321-333.
- Levänen, S. & Hamdorf, D. (2001). Feeling vibrations: enhanced tactile sensitivity in congenitally deaf humans. *Neuroscience Letters*, *301*, 75-77.

- McGlone, F. & Reilly, D. (2010). The cutaneous sensory system. *Neuroscience and Biobehavioral Review*, 34, 148-159.
- McGurk, H. & MacDonald, J. (1976). Hearing lips and seeing voices. *Nature*, 264, 746-748.
- Mens, L. H. M. (2007). Advances in cochlear implant telemetry: Evoked neural responses, electrical field imaging, and technical integrity. *Trends in Amplification*, 11, 143-159.
- Merchan, M., Aguilar, L.A., Lopez-Poveda, E.A. & Malmierca, M.S. (2005). Projections to the subcortical forebrain from anatomically defined regions of the medial geniculate body in the rat. *Neuroscience*, 136, 907-925.
- Moallem, T.M., Reed, C.M. & Braida, L.D. (2010). Measures of tactual détection and temporal order résolution in congenitally deaf and normal-hearing adults. *Journal of the Acoustical Society of America*, 127, 3696-3709.
- Moberg, E. (1990). Two-point discrimination test a valuable part of hand surgical réhabilitation, e.g. in tetraplegia. *Scandinavian Journal of Rehabilitation Medicine*, 22, 127-134.
- Molholm, S., Ritter, W., Murray, M. M., Javitt, D. C., Schroeder, C. E. & Foxe, J. J. (2002). Multisensory auditory-visual interactions during early sensory processing in humans: A high-density electrical mapping study. *Cognitive Brain Research*, 14, 115-128.
- Moore, B.C.J. (2002). Interference effects and phase sensitivity in hearing. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Physical, Mathematical and Engineering Sciences*, 360, 833-858.

- Moore, J.K. & Linthicum, F.J. (2007). The human auditory system: A timeline of development. *International Journal of Audiology*, 46, 460-478.
- Nishimura, H., Hashikawa, K., Doi, K., Iwaki, T., Watanabe, Y., Kusuoka, H., ... Kubo, T. (1999). Sign language heard in the auditory cortex. *Nature*, 397, 116.
- Oliver, D.L., Becklus, G.E. & Shneiderman, A. (1995). Axonal projections from the lateral and medial superior olive to the inferior colliculus of the cat: a study using electron microscopic autoradiography. *The Journal of Comparative Neurology*, 360, 17-32.
- Osen, K.K. (1972). Projections of the cochlear nuclei on the inferior colliculus in the cat. *The Journal of Comparative Neurology*, 144, 355-371.
- Pearson, J.D., Morreli, C.H., Gordon-Salant, S., Brant, L.J., Metter, E.J., Klein, L.L. & Fozard, J.L. (1994). Gender differences in a longitudinal study of age-associated hearing loss. *Journal of the Acoustical Society of America*, 97, 1196-1205.
- Pelizzone, M., Kasper, A. & Montandon, P. (1989). Electrically evoked responses in cochlear implant patients. *Audiology*, 28, 230-238.
- Penfield, W. & Boldrey, E. (1937). Somatic motor and sensory representation in the cerebral cortex of man as studied by electrical stimulation. *Brain*, 60, 389-443.
- Petitto, L.A., Zatorre, R.J., Gauna, K., Nikelski, E.J., Dostie, D. & Evans, A.C. (2000). Speech-like cerebral activity in profoundly deaf people processing signed languages: Implications for the neural basis of human language. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 97, 13961-13966.

- Pick, H.L. Jr., Warren, D.H. & Hay, J.C. (1969) Sensory conflict in judgments of spatial direction. *Perception & Psychophysics*, 6, 203–205.
- Pollak, G.D., Burger, R.M. & Klug, A. (2003). Dissecting the circuitry of the auditory system. *TRENDS in Neurosciences*, 26, 33-39.
- Pollak, G.D., Xie, R., Gittelman, J.X., Andoni, S. & Li, N. (2011). The dominance of inhibition in the inferior colliculus. *Hearing Research*, 274, 27-39.
- Putzar, L., Goerendt, I., Lange, K., Rösler, F. & Röder, B. (2007). Early visual deprivation impairs multisensory interactions in humans. *Nature Neuroscience*, 10, 1243-1245.
- Purves, D., Augustine, G., Fitzpatrick, D., Katz, L., LaMantia, A., McNamara, J. & Williams, S. (2005). *Neuroscience* (3e éd.). Bruxelles : De Boek.
- Ramsden, R. T. (2002). Cochlear implants and brain stem implants. *British Medical Bulletin*, 63, 183-193.
- Reisberg, D. & Leak, S. (1987). Visual imagery and memory for appearance: Does Clark Gable or George C. Scott have bushier eyebrows? *Canadian Journal of Psychology*, 41, 521-526.
- Rouger, J., Fraysse, B., Deguine, O. & Barone, P. (2008). McGurk effects in cochlear-implanted deaf subjects. *Brain Research*, 1188, 87-99.
- Rouger, J., Lagleyre, S., Fraysse, B., Deneve, S., Deguine, O. & Barone, P. (2007). Evidence that cochlear-implanted deaf patients are better multisensory

integrators. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104, 7295-7300.

Sadato, N., Okada, T., Honda, M., Matsuki, K.-I., Yoshida, M., Kashikura, K.-I., ... Yonekura, Y. (2005). Cross-modal integration and plastic changes revealed by lip movement, random-dot motion and sign languages in the hearing and deaf. *Cerebral Cortex*, 15, 1113-1122.

Sahley, T.L., Musiek, F.E. & Nodar, R.H. (1997). *Efferent Auditory system structure and function*. San Diego: Singular.

Sato, M. (1961). Response of Pacinian corpuscles to sinusoidal vibration. *The Journal of Physiology*, 159, 391-409.

Schiff, W. & Dytell, R.S. (1972). Deaf and hearing children's performance on a tactual perception battery. *Perceptual & Motor Skills*, 35, 683-706.

Schorr, E.A., Fox, N.A., van Wassenhove, V. & Knudsen, E.I. (2005). Auditory-visual fusion in speech perception in children with cochlear implants. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102, 18748-18750.

Schroeder, C., Lindsley, R., Specht, C., Marcovici, A., Smiley, J. & Javitt, D. (2001). Somatosensory input to auditory association cortex in the macaque monkey. *Journal of Neurophysiology*, 85, 1323-1327.

Schröger, E. & Widmann, A. (1998). Speeded responses to audiovisual signal changes result from bimodal integration. *Psychophysiology*, 35, 755-759.

Schürmann, M., Caetano, G., Jousmäki, V. & Hari, R. (2004). Hands help hearing: Facilitatory audiotactile interaction at low sound intensity levels. *Journal of the*

Acoustical Society of America, 115, 830–832.

- Schürmann, M., Caetano, G., Hlushchuk, Y., Jousmäki, V. & Hari, R. (2006). Touch activates human auditory cortex. *Neuroimage*, 30, 173-182.
- Schwartz, J.-L. (2010). A reanalysis of McGurk data suggests that audiovisual fusion in speech perception is subject-dependent. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 127, 1584-1594.
- Shams, L., Kamitani, Y. & Shimojo, S. (2000). What you see is what you hear. *Nature*, 408, 788.
- Sharma, A., Gilley, P.M., Dorman, M.F. & Baldwin, R. (2007). Deprivation-induced cortical reorganization in children with cochlear implants. *International Journal of Audiology*, 46, 494-499.
- Soto-Faraco, S. & Deco, G. (2009). Multisensory contributions to the perception of vibrotactile events. *Behavioural Brain Research*, 196, 145-154.
- Spicher, C.J., Hecker, E., Thommen, E. & Rouiller, E.M. (2005). La place du test de discrimination de 2 points statiques dans l'examen clinique. *Douleur et Analgésie*, 18, 73-78.
- Stein, B. & Stanford, T. (2008). Multisensory integration : current issues from the perspective of a single neuron. *Nature Reviews Neuroscience*, 9, 255-266.
- Stein, B. & Meredith, M. (1993). *The Merging of the Senses*, Cambridge : MIT Press.
- Summerfield, Q. (1987). Speech perception in normal and impaired hearing. *British Medical Bulletin*, 43, 909-925.

- Tremblay, C., Champoux, F., Lepore, F. & Théoret, H. (2010). Audiovisual fusion and cochlear implant proficiency. *Restorative Neurology and Neuroscience*, 28, 283-291.
- Tremblay, S., Shiller, D. & Ostry, D. (2003). Somatosensory basis of speech production. *Nature*, 423, 866-869.
- Van Boven R.W. & Johnson K.O. (1994). A psychophysical study of the mechanisms of sensory recovery following nerve injury in humans. *Brain*, 117, 149-167.
- Van Boven, R.W., Hamilton, R.H., Kauffman, T., Keenan, J.P. & Pascual-Leone, A. (2000). Tactile spatial resolution in blind Braille readers. *Neurology*, 54, 2230-2236.
- Von Békésy, G. (1959). Similarities between hearing and skin sensations. *The Psychological Review*, 66, 1-22.
- Wallace, M. T. (2004). The development of multisensory processes. *Cognitive Processing*, 5, 69-83.
- Wallace, M.T., Carriere, B.N., Perrault, T.J. Jr., Vaughan, J.W. & Stein, B.E. (2006). The development of cortical multisensory integration. *The Journal of Neuroscience*, 26, 11844-11849.
- Wallace, M. T. & Stein, B. (1997). Development of multisensory neurons and multisensory integration in cat superior colliculus. *The Journal of Neuroscience*, 17, 2429-2444.
- Wallace, M.T. & Stein, B. (2001). Sensory and multisensory responses in the newborn monkey superior colliculus. *The Journal of Neuroscience*, 21, 8886-8894.

- Wallace, M.T. & Stein, B.E. (2007). Early experience determines how the senses will interact. *Journal of Neurophysiology*, 97, 921-926.
- Warr, W.B. (1968). Fiber degeneration following lesions in the posteroventral cochlear nucleus of the cat. *Experimental Neurology*, 23, 140-155.
- Wilson, B. S. & Dorman, M. F. (2008). Cochlear implants: A remarkable past and a brilliant future. *Hearing Research*, 242, 3-21.
- Winer, J.A. & Schreiner, C.E. (2005). *The Inferior Colliculus*. New York: Springer.
- Wu, S.H. (1999). Physiological properties of neurons in the ventral nucleus of the lateral lemniscus of the rat: intrinsic membrane properties and synaptic responses. *Journal of Neurophysiology*, 81, 2862-2874.
- Yost, W.A. & Nielsen, D.W. (1985). *Fundamentals of Hearing: An Introduction*. (2^e ed.). New York : Holt, Rinhart & Winston.