

Université de Montréal

Preuves comportementales de capacités olfactives améliorées chez les personnes sourdes

Par

Rim Nazar

Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de maîtrise
en Sciences Biomédicales, option Recherche clinique appliquée

Août 2020

© Rim Nazar, 2020

Résumé

La privation sensorielle, et tout particulièrement la déficience auditive, s'avère un excellent modèle théorique pour étudier les phénomènes de neuroplasticité dans le cerveau humain ainsi que les comportements adaptatifs qui se manifestent afin de soutenir le quotidien des individus privés d'une modalité sensorielle. Pour s'adapter à leur handicap, les individus sourds se reposent quotidiennement sur leurs autres sens restés intacts. Les éléments de preuves les plus cohérents dans la littérature sont en faveur de performances visuelles et tactiles supérieures chez les individus sourds profonds congénitaux. Dans cette étude, nous souhaitons explorer les habiletés olfactives chez les individus sourds congénitaux. Pour cela, nous avons évalué de façon exhaustive les capacités olfactives de 11 individus sourds congénitaux par le biais de tâches psychophysiques portant sur les processus de détection, d'identification, de discrimination et de localisation d'odorants, en comparaison à 11 individus neurotypiques. Le test du Sniffin' Sticks et un olfactomètre ont été utilisés afin d'identifier de potentielles différences de performance olfactive entre les deux populations. Les résultats démontrent que la privation auditive entraîne des performances supérieures dans la modalité olfactive chez les individus sourds congénitaux en comparaison à des individus neurotypiques.

Mots-clés : Olfaction, Sourds Congénitaux, Neuroplasticité, Privation Sensorielle, Adaptation.

Abstract

Sensory deprivation, and particularly hearing impairment, is an excellent theoretical model for studying the phenomena of neuroplasticity in the human brain, as well as the adaptive behaviours available in order to support the daily lives of individuals deprived of a sensory modality. To adapt to their handicap, deaf individuals rely daily on their other senses that remained intact. Evidence from literature has consistently supported superior visual and tactile performance in congenitally deaf individuals. In this study, we explored complete olfactory skills in congenitally deaf individuals. For this, we evaluated the olfactory capacities of 11 congenitally deaf individuals through psychophysical tasks relating to the processes of detection, identification, discrimination and localization of odours, in comparison with 11 hearing individuals. The Sniffin' Sticks test and an olfactometer were used to identify potential differences in olfactory performance between the two groups. The results demonstrated that hearing deprivation leads to superior performance in terms of olfactory modality in congenitally deaf individuals compared to hearing individuals.

Keywords: Olfaction, Congenital Deaf, Neuroplasticity, Sensory Deprivation, Adaptation.

Table des matières

Résumé	2
Abstract	3
Table des matières	4
Liste des tableaux	7
Liste des figures	8
Liste des sigles et abréviations	9
Remerciements	11
Chapitre 1 – Introduction	12
1.1 L’olfaction	12
1.2 Les systèmes olfactif et trigéminal	12
1.2.1 La périphérie du système olfactif	12
1.2.2 La partie centrale du système olfactif.	13
1.2.3 Le système trigéminal.....	16
1.2.4 L'interaction entre les systèmes olfactif et trigéminal : la perception chimiosensorielle	19
1.3 La privation sensorielle et la neuroplasticité	20
1.4 La fonction olfactive de la population sourde	24
1.5 Objectif	25
1.6 Hypothèses	26
Chapitre 2 – Article	27
2.1 Introduction	30
2.2 Method	33
2.2.1 Participants.....	33
2.2.2 Procedure	34

2.2.3 Material	36
2.3 Statistical analyses	38
2.4 Results.....	38
2.4.1 Sniffin' Sticks: Threshold detection, discrimination and identification	38
2.4.2 Accuracy and speed for odor localization and identification	39
2.4.3 Effect of cochlear implant	42
2.5 Discussion	43
2.5.1 Olfactory function and neuroplasticity.....	43
2.5.2 Impact of Cochlear implants (CI)	45
2.5.4 Limits of the study and futures directions.....	45
2.6 Conclusion.....	46
Disclosure	46
RÉFÉRENCES - Article	47
<i>Chapitre 3 – Discussion.....</i>	<i>55</i>
3.1 Objectif de l'étude.....	55
3.2 Résultats	55
3.2.1 Sniffin' Sticks : seuil, discrimination et identification	56
3.2.2 Précision et vitesse de localisation et d'identification	57
3.2.3 Tests cognitifs	58
3.2.4 Port de l'implant cochléaire	58
3.3 Caractéristiques adaptatives des résultats.....	59
3.3.1 Plasticité adaptative	59
3.3.2 Plasticité maladaptative	61
3.4 Implant cochléaire et période critique	62
3.6 Limite de l'étude.....	64
3.7 Orientations futures	64
3.8 Conclusion.....	65
<i>Références bibliographiques</i>	<i>67</i>

Annexe 1: Affiche de recrutement85
Annexe 2: Tableau des scores au test du Sniffin'Sticks86

Liste des tableaux

Table 1: Characteristics of deaf participants in the sample - Detailed table	33
Table 2: Mean scores for the Sniffin 'Sticks tasks and for the overall TDI.....	38
Table 3: Mean scores of the accuracy for the localization and the identification tasks; Olfactometer.....	40
Table 4: Mean scores of the RTs for the localization and the identification tasks; Olfactometer	41

Liste des figures

Figure 1: Le système olfactif principal. D'après Marieb & Hoehn (2010)	15
Figure 2: Sub-tests and overall TDI score of the Sniffin' Sticks test.....	39
Figure 3: Accuracy of the two sub-tasks of the olfactometer test.....	40
Figure 4: RTs of the two sub-tasks of the olfactometer test	42

Liste des sigles et abréviations

COF : cortex orbitofrontal

NRO : neurones récepteurs olfactifs

TRP : canaux à potentiel de récepteur transitoire

LOT : tractus olfactif latéral

TDI : score composite des seuils de détection, de discrimination et d'identification du test Sniffin' Sticks

LSQ : langue des signes québécoise

IC : implant cochléaire

CI: Cochlear implant

RTs: Response times

Rm: Repeated measures

Bfs: between subject factor

Wsf: within subject factor

À ma famille

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes sans qui la réalisation de mon projet de maîtrise n'aurait pu être possible.

Tout d'abord je souhaite remercier le D^r Franco Lepore d'avoir accepté d'être mon directeur de recherche et de m'avoir permis de réaliser mon projet de maîtrise au sein de son équipe. Je souhaite aussi remercier mon co-directeur, le D^r Johannes Frasnelli. Merci à vous deux pour votre soutien et vos enseignements, ainsi que pour les opportunités offertes qui ont fait de mon parcours une expérience stimulante et enrichissante. Cette recherche m'a permis de faire un premier saut dans le monde de la recherche. À travers les défis, j'ai acquis des connaissances qui continueront d'alimenter ma carrière.

Merci à Catherine Landry et Marie Simon pour l'aide précieuse, les conseils et les critiques constructives qui ont rendu possible la réalisation de mon projet de maîtrise. Votre aide a permis de concrétiser cette recherche, et par le fait même, la complétion de ma maîtrise en sciences biomédicales.

Je remercie l'Institut Raymond Dewar, et plus précisément Martine Gendron, qui a grandement contribué au recrutement de la population à l'étude. Un grand merci aussi à la Maison des Sourds de m'avoir accueilli à maintes reprises.

Enfin, merci à tous ceux qui m'ont épaulée de près ou de loin : à mes chers parents, à mes sœurs, à mes frères, à mes amies et à mon meilleur ami et époux pour leur soutien inconditionnel, qui m'encourage à persévérer depuis le début de mes études.

À vous, je dédie ce mémoire.

Chapitre 1 – Introduction

1.1 L'olfaction

L'olfaction est un sens chimique qui nous permet de reconnaître une multitude de substances chimiques volatiles (odorants). Parmi les cinq sens, l'odorat est le plus ancien en termes d'évolution de la vie terrestre (Cowart & Rawson, 2008). Lors du troisième trimestre de gestation, les narines deviennent évidentes, ce qui permet une stimulation des voies nasales par les substances retrouvées dans le liquide amniotique (Lecanuet & Schaal, 2002). La maturation du système olfactif commence donc précocement. Après le quatrième jour suivant la naissance, les nouveau-nés sont capables de discriminer le sein de leur mère par rapport à celui d'une autre femme grâce à l'odorat (Schaal et al., 1980). En outre, l'odorat joue de multiples rôles au quotidien dont la détection et l'identification d'aliments comestibles, l'évaluation de situations potentiellement dangereuses, la navigation au sein de notre environnement et influence sur la sélection de partenaires sexuels, nos interactions sociales, notre nutrition, notre bien-être et les processus à la base de notre mémoire (Huart et al., 2013; Doty, 2001; Sarafoleanu et al., 2009; Stevenson, 2010). Notre comportement est donc considérablement influencé par notre sens de l'odorat. Selon Bushdid et collaborateurs (2014), l'humain peut discriminer au moins un billion de stimuli olfactifs.

Dans le présent mémoire, nous présenterons d'abord le fonctionnement du système olfactif et du système trigéminal, ainsi que l'interaction entre les deux. La privation sensorielle et la neuroplasticité seront ensuite abordées. Finalement, nous introduirons la fonction olfactive de la population souffrant de surdité.

1.2 Les systèmes olfactif et trigéminal

1.2.1 La périphérie du système olfactif.

Le système olfactif périphérique comprend l'épithélium olfactif, soit la structure au sein de laquelle le processus de transduction de l'information olfactive est initialisé. La transduction se définit par une série d'évènements neuronaux qui conduit à la perception des odeurs et des fascicules du nerf olfactif, soit des petits faisceaux de fibres nerveuses (Purves et al., 2017). Les molécules odorantes atteignent la cavité nasale qui est une structure osseuse recouverte d'un épithélium. Le flux d'air est ensuite guidé par des cornets nasaux et atteint la fente olfactive dans laquelle les molécules odorantes entrent en contact avec l'épithélium olfactif (Huart et al., 2013). L'épithélium olfactif est situé au-dessous de la plaque cribiforme de l'os ethmoïde et se compose de 6 à 10 millions neurones récepteurs olfactifs (NRO ; Leinders-Zufall et Ma, 2009), comprenant des cellules de soutien, des cellules basales et de glandes de Bowman (Huart et al., 2013).

Les récepteurs olfactifs, quant à eux, sont localisés sur les cils aux extrémités dendritiques des NRO. Ceux-ci génèrent alors un potentiel d'action lorsqu'une substance chimique odorante se lie à leurs récepteurs (Holley, 2006), étape charnière du traitement olfactif. D'ailleurs, un seul type de récepteur d'odorants est exprimé par les NRO. La spécialisation des récepteurs olfactifs s'applique donc à un nombre restreint d'odeurs (Buck et Axel, 1991), assignant ainsi tous les types de récepteurs olfactifs à des modèles d'activation. La reconnaissance de ces modèles génère la perception des odeurs, donnant lieu à un nombre quasi illimité d'odeurs senties par l'être humain (Holley, 2006).

Les molécules odorantes atteignent la cavité nasale au moyen des narines (voie orthonasale) ou de la bouche par le nasopharynx (voie rétronasale) (Cowart et Rawson, 2008). Pourtant, malgré le rôle principal de la voie rétronasale dans la perception du goût, la plupart des études en olfaction se focalisent sur des stimuli orthonasaux (Cowart et Rawson, 2008). L'article présenté dans ce mémoire tient compte de cette limitation en incluant des stimuli dont les propriétés trigéminales sont connues.

1.2.2 La partie centrale du système olfactif.

Le système olfactif central est composé du bulbe olfactif et de ses connexions nerveuses centrales (Hummel & Frasnelli, 2019). Les axones des NRO convergent dans les fascicules du nerf olfactif et passent au travers de trous qui parsèment la plaque cribiforme de l'os ethmoïde pour ensuite se

projeter ipsilatéralement vers les glomérules (c.-à-d., des structures sphériques du bulbe olfactif). Chaque glomérule reçoit les axones des NRO portant le même type de récepteur (Huart et al., 2013). Les axones de neurones exprimant un même récepteur convergent ainsi vers les glomérules en fonction d'une carte sensorielle. Par conséquent, dans le nez tout comme dans le bulbe olfactif, les informations associées aux récepteurs olfactifs sont anatomiquement séparées ; dans le nez en fonction de différents neurones et dans le bulbe olfactif, au moyen de glomérules traitant l'entrée sensorielle d'un type de récepteur (Malnic et al., 1999).

Le bulbe olfactif est formé de couches multicellulaires, contenant les axones des NRO ainsi que des cellules mitrales, tuftées et granulaires (interneurones). La fusion des axones des cellules mitrales et tuftées forme le tractus olfactif qui est logé à la base du cerveau antérieur (Huart et al., 2013). Le bulbe olfactif transmet l'information au cortex olfactif primaire (qui comprend plusieurs régions cérébrales situées dans le lobe frontal et le lobe temporal, telles que le cortex piriforme, entorhinal et l'amygdale) par le biais du tractus olfactif et la strie olfactive latérale (Huart et al., 2013). Les projections du cortex primaire sont en majorité ipsilatérales, quoique certaines connexions sont contralatérales par la commissure antérieure (Lascano et al., 2010). De plus, certaines des structures incluses dans le cortex olfactif primaire ont des projections dans des centres cognitifs plus élevés du cerveau (aussi nommé structures olfactives secondaires ; Huart et al., 2013). Ces structures (c.-à-d., thalamus, hypothalamus, hippocampe, cortex orbitofrontal (COF) et insula) ont aussi des connexions entre elles (Huart et al., 2013). Concernant le traitement de l'information olfactive, il se fait en premier lieu ipsilatéralement à la narine stimulée jusqu'au bulbe olfactif, suivi de l'amygdale et les structures du gyrus parahippocampique (c.-à-d., cortex entorhinal, cortex piriforme). Puis, au cours des étapes de traitement ultérieures, les activations cérébrales deviennent bilatérales aux zones temporales mésiales et latérales jusqu'à la région frontale (Lascano et al., 2010).

Les différentes régions corticales de l'olfaction s'activent en fonction de la nature des tâches en cours. Parmi les activations de régions comprises dans le cortex olfactif primaire, la partie antérieure du cortex piriforme s'avère impliquée dans le codage de l'identité d'odorante, c'est-à-dire la structure des constituants moléculaires et chimiques d'un odorant, tandis que la partie postérieure, zone sensorielle et associative, sert plutôt au codage de la qualité des odeurs

(Gottfried, 2010). Les représentations d'objets sont alors définies et mises à jour par l'entremise d'apprentissages et d'expériences dans la partie postérieure (Gottfried, 2010). Pour nommer quelques fonctions des structures olfactives secondaires, le COF semble impliqué dans la convergence multimodale (Gottfried et Dolan, 2003) ainsi que dans les processus de discrimination, de reconnaissance et de récompense d'odeurs (Rolls, 2004).

En résumé, le traitement olfactif cortical chemine selon une voie hiérarchique et parallèle au travers de deux faisceaux, une qui se dirige vers le cortex olfactif primaire et la seconde vers le cortex olfactif secondaire. La fonction olfactive se démarque aussi par l'absence de relai thalamique par la majorité de ses fibres, avec les glomérules pour seul relai entre la périphérie et le cortex (Huart et al., 2013). En complément, les structures cérébrales impliquées dans le traitement de l'information olfactive ne sont pas exclusivement consacrées à la fonction olfactive, en comparaison aux autres systèmes sensoriels. Par exemple, l'amygdale a un rôle dans la mémoire olfactive (Gottfried et al., 2006), mais s'active aussi en fonction de l'intensité ou la valence des stimuli (Winston et al., 2005). De nombreux facteurs peuvent d'ailleurs influencer sur les régions cérébrales activées (par ex., le type de tâche, la nature des stimuli, etc.). Voir figure 1.

Figure 1: Le système olfactif principal.

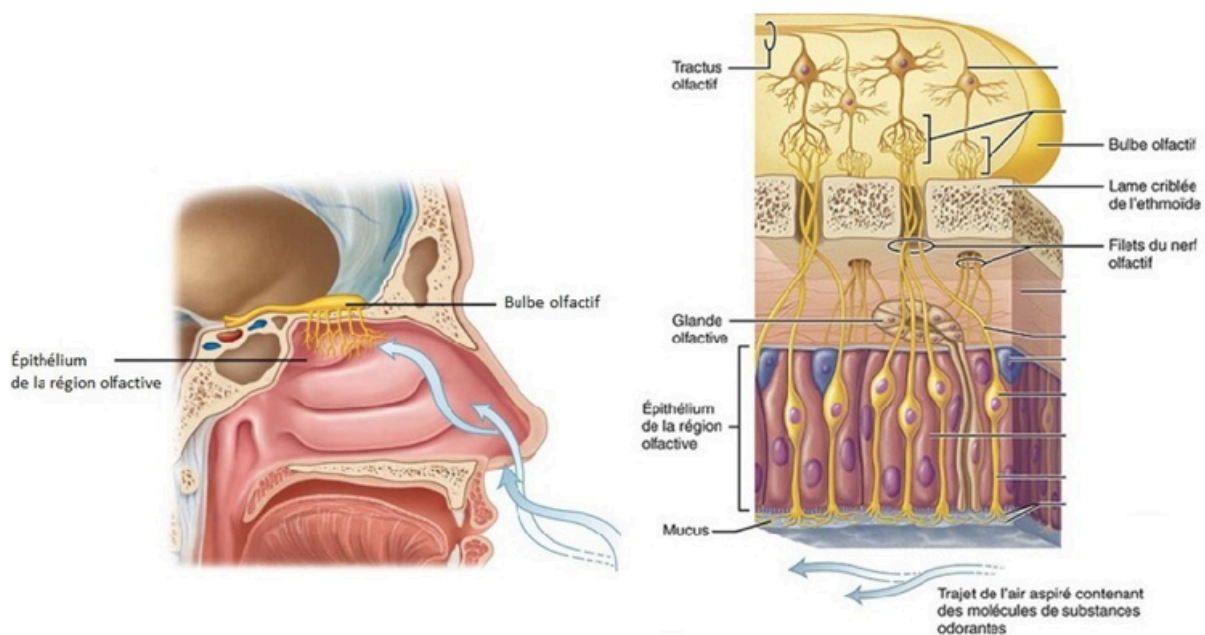


Figure1, D'après Marieb & Hoehn (2010). Par Blachère, C. (2016). L'olfaction chez le patient laryngectomisé total: apports d'ateliers de réhabilitation olfactive. <https://www.semanticscholar.org/paper/L'olfaction-chez-le-patient-laryngectomis%C3%A9-total-%3A-Blach%C3%A8re/d7a01f5bdd444aea1aac9a987a59584dcb6ac90/figure/0>

1.2.3 Le système trigéminal

Notre sens de l'odorat est médié par deux systèmes, le système olfactif et le système trigéminal (Hummel & Livermore, 2002). De son côté, le système trigéminal donne plusieurs informations chimiosensorielles du nez et de la bouche, sur des odeurs et certains aliments (Frasnelli & Manescu, 2017). Il est donc considéré comme le troisième sens chimique, aux côtés de l'odorat et du goût. De plus, bien qu'utile dans l'expérience sensorielle globale, ce système aurait évolué pour nous informer de l'emplacement de situations potentiellement dangereuses. Son rôle de sentinelle dans l'inhalation permet aux voies respiratoires de bloquer l'inspiration de substances dangereuses (Silver, 1991). À titre exemple, la présence de fumée irriterait notre épithélium respiratoire et nous signifierait la présence d'un incendie (Huff & Daly, 2018).

Les odorants sont dits purs lorsqu'ils stimulent exclusivement le système olfactif, c'est-à-dire sans activation conjointe du système trigéminal (Hummel & Frasnelli, 2019). Pour sa part, le système trigéminal intranasal est stimulé par des températures et des stimuli chimiques qui évoquent des sensations. Par exemple, une stimulation des récepteurs TRPA1 par des températures froides inférieures à 17 °C et la présentation de thioisocyanate d'allyle (huile de moutarde) génèrent une sensation de douleur (Bandell et al., 2004). Une sensation de fraîcheur peut être induite par le biais d'une stimulation des récepteurs TRPM8 avec des températures inférieures à 28 °C (McKemy et al., 2002), le menthol (menthe ; McKemy et al., 2002) et l'eucalyptol (eucalyptus ; Behrendt et al., 2004). D'autres sensations peuvent aussi être ressenties, telles que la brûlure ou le picotement, et ce, au travers d'une stimulation des récepteurs TRPV1 par des températures supérieures à 43 °C (Caterina et al., 1997), du capsaïcine (Caterina et al., 1997), de l'eugénol (Yang et al., 2003) et des acides (Jordt et al., 2004) (Frasnelli & Manescu, 2017).

Comme la majorité d'odorants activent de façon concomitante le système trigéminal, les odorants purs se font rares (Frasnelli & Manescu, 2017). Ainsi, seul un nombre limité d'odorants

purs stimuleront uniquement le système olfactif ou auront peu de co-stimulation avec le système trigéminal. Parmi ces odorants, on retrouve la vanilline (odeur de vanille ; Kettenmann et al., 1997), l'hydrogène sulfure qui génère une odeur d'œuf pourri (H₂S ; Jacquot et al., 2010; Kobal et al., 1989) et l'acide décanoïque, un odorant qui ressemble au rance (Doty et al., 1978). En fonction de leur concentration, la plupart des substances chimiques volatiles activent donc ces deux systèmes (Doty et al., 1978). Une hypothèse est d'ailleurs émise quant à l'interaction entre les systèmes olfactif et trigéminal, suggérant qu'elle surviendrait à trois niveaux, soit à l'échelle des stimuli, de la périphérie et de la partie centrale (Frasnelli & Manescu, 2017).

On trouve un manque de spécificité dans la littérature avec l'expression « système olfactif » qui ne semble pas toujours exclusive au système olfactif. En effet, la distinction avec le système trigéminal n'est pas toujours mise de l'avant (Hummel & Frasnelli, 2019). De plus, le terme odeur est réservé au percept évoqué par les stimulations olfactives (perception) alors que le terme odorant désigne plutôt les substances chimiques. Ainsi, bien que des termes plus spécifiques peuvent être utilisés (par ex., chimiosensoriel, sens chimique, produits chimiques ou irritants), la terminologie utilisée au sein de ce mémoire sera en accord avec la littérature pour des raisons de simplicité, de lisibilité et d'uniformité.

Malgré tous ces rôles, le système trigéminal a rarement fait l'objet d'étude dans la littérature sur l'olfaction (Frasnelli & Manescu, 2017). Contrairement aux odorants purs, les stimuli activant le système trigéminal peuvent être localisés par l'être humain (Frasnelli et al., 2009). Lors de la présentation d'un odorant pur, plus précisément de l'alcool phényléthylique dilué, Frasnelli et collaborateurs (2009) ont rapporté aucune preuve que les participants étaient en mesure de localiser la substance. Ainsi, un odorant peut seulement être localisé dans la mesure où il contient une qualité trigéminal. Comme ces odorants activent le nerf trijumeau, ils ne peuvent être identifiés comme des odorants purs (Frasnelli et al., 2009). En revanche, une étude subséquente a montré que parmi huit odorants non dilués, seul le menthol a été localisé au-delà du niveau de chance par les participants (Frasnelli et al., 2011). Les auteurs soulèvent qu'une différence de volume peut expliquer des discordances dans la littérature concernant le nerf trijumeau. Cela suggère que l'interaction entre les systèmes olfactif et trigéminal peut dépendre

de la concentration de l'odorant (Huart et al., 2013). Dans ce cas-ci, la concentration dépend de la dilution de la substance.

Concernant la structure du système, il se compose du nerf trigéminal (CN V) qui contient trois branches : le nerf ophtalmique (CN V1), le nerf maxillaire (CN V2) et le nerf mandibulaire (CN V3) (Huff et Daly, 2018). Ce nerf crânien innerve à la fois la peau du visage et la muqueuse du nez, de la bouche et des yeux, permettant ainsi une perception trigéminal. Les stimuli chimiques activent donc des récepteurs du nerf trijumeau, qui sont pour la plupart des canaux ioniques de la sous-famille du potentiel récepteur transitoire (TRP ; Frasnelli et Manescu, 2017). Les récepteurs TRP ont la propriété d'être des nocicepteurs polymodaux, signifiant qu'ils sont activés par des stimuli thermiques et chimiques (Boonen et al., 2016), permettant ainsi des sensations de refroidissement, de brûlure, de picotements et de fourmillements (Sell, 2014). Des études démontrent d'ailleurs l'existence de canaux non-TRP qui s'activeraient en présence de nicotine (récepteurs nicotiques de l'acétylcholine) et d'acides (canaux ioniques à protons) (Thuerauf et al., 1999; Waldmann et al., 1997). Une fois inhalé, l'air traversant nos voies respiratoires nasales est chauffé jusqu'à 30 - 32 °C (Keck et al., 2000). Les déviations de ces températures de référence sont alors placées sur un continuum de sensations allant de froid douloureux à très chaud (Bandell et al., 2004).

Lorsque les récepteurs sont stimulés, le signal sensoriel passe dans les fibres du nerf trigéminal en traversant l'épithélium respiratoire de la cavité nasale et chemine jusqu'au ganglion trigéminal contenant des neurones pseudo-unipolaires, soit des neurones qui ne font pas synapse dans le ganglion (Frasnelli et Manescu, 2017). Les fibres nerveuses se projettent ensuite vers le tronc cérébral, lieu du premier relai, puis continuent vers le second relai dans le thalamus, pour finalement cheminer dans le troisième et dernier relai situé dans les zones somatosensorielles (Brand, 2006). La voie trigéminal, comme les projections somatosensorielles, est croisée (Brand, 2006). Par contre, des auteurs proposent que des sites de projection ipsilatéraux sont aussi présents, similairement aux voies olfactives (Brand, 2006). D'ailleurs, les fibres restent organisées somatotopiquement tout au long de la voie (Frasnelli et Manescu, 2017). Au-delà des structures somatosensorielles, le système trigéminal active également d'autres régions comme le thalamus

postérieur ventrolatéral, le cingulaire antérieur (Albrecht et al., 2010), le cortex piriforme, l'insula et le COF (Boyle et al., 2007; Frasnelli et Manescu, 2017).

1.2.4 L'interaction entre les systèmes olfactif et trigéminal : la perception chimiosensorielle

Comme mentionné précédemment, seule une poignée de stimulants olfactifs activera exclusivement le système olfactif (c.-à-d., odorants purs) dans des conditions naturelles de reniflement. Une méthode permettant d'évaluer l'interaction entre les systèmes trigéminal et olfactif consiste à tester des personnes ayant des dysfonctionnements olfactifs et identifier l'impact sur la perception trigéminal ou vice-versa. Par exemple, un odorant à concentration élevée utilisé expérimentalement peut produire une stimulation intranasale du nerf trijumeau chez des individus souffrant d'anosmie (c.-à-d., perte temporaire ou permanente de la capacité à sentir) (Doty et al., 1978). Ainsi, la capacité à détecter un composé chimique volatil peut persister par un traitement effectué par le nerf trigéminal dont la sensibilité est plus faible chez les personnes souffrant d'anosmie (Gudziol et al., 2001; Kobal et al., 1996).

Par conséquent, d'autres résultats appuient l'interaction entre ces deux systèmes dans l'expérience sensorielle globale de l'odorat. En effet, il a été démontré qu'une stimulation du nerf trijumeau génère une activation de régions utilisées dans le traitement d'informations odorantes (Boyle et al., 2007). Plus précisément, des stimuli olfactifs co-activent le cortex piriforme controlatéral, le COF antérieur et l'insula rostrale (Boyle et al., 2007). De plus, la perméabilité du mucus retrouvé dans l'épithélium olfactif peut être modifiée par des interactions indirectes par lesquelles le traitement olfactif est altéré par les réflexes trigéminaux (Finger et al., 1990). Bien que les fibres trigéminales se croisent comme toutes les projections sensorielles, des auteurs soulignent la présence de sites de projections ipsilatéraux, tels que retrouvés avec le traitement olfactif (Brand, 2006).

En résumé, au moins quatre mécanismes expliqueraient l'influence de l'activité trigéminal sur le traitement olfactif : (1) les systèmes interagissent de façon centralisée (2) le système trigéminal peut moduler l'activité du bulbe olfactif avec ou sans stimulation d'odeurs (3) une activation indirecte du trijumeau peut influencer la perception olfactive via les réflexes du

trijumeau nasal et (4) la réponse des récepteurs olfactifs peut être modifiée par la libération de peptides (Hummel et Livermore, 2002).

1.3 La privation sensorielle et la neuroplasticité

La neuroplasticité, aussi nommée plasticité cérébrale, est définie comme la capacité d'adaptation que possède le cerveau et sa propension à changer durant toute la vie (Oberman et Pascual-Leone, 2013). Plusieurs études ont démontré l'existence d'une période critique en début de vie postnatale au cours de laquelle le cerveau est le plus réceptif au changement (Oberman et Pascual-Leone, 2013). De nombreuses études comportementales et d'imagerie ont évalué la performance d'individus sourds dans diverses modalités sensorielles afin d'éclaircir la compréhension du fonctionnement cérébral lors d'une perte d'audition. Au-delà des preuves expérimentales, des affirmations anecdotiques ont aussi mis en lumière la présence de compensations sensorielles chez les personnes privées d'une modalité sensorielle (Oberman et Pascual-Leone, 2013). La privation sensorielle est donc un modèle intéressant dans l'étude du traitement olfactif, à savoir si les processus à la base de cette fonction peuvent être améliorés chez des personnes sourdes en comparaison à des individus entendants. Comme peu d'études se sont penchées sur les individus sourds, un survol de la littérature de la population souffrant de cécité sera présenté dans la présente section afin d'expliquer davantage ce qu'est la neuroplasticité lorsqu'un facteur interne, dans ce cas-ci la cécité, influence la perception des autres sens.

Diverses études ont rapporté que les individus aveugles possèdent des suprap performances dans les autres modalités sensorielles. En effet, ces individus doivent se reposer davantage sur des indices non visuels, tels que les sons, afin d'interagir avec leur environnement. Ainsi, des capacités de traitement supérieures (suprap performances) dans les modalités sensorielles préservées (ex. visuel) impliquent un recrutement du cortex auditif et supportent l'hypothèse d'un phénomène de plasticité cérébrale compensatoire de type intermodal entre les modalités auditive et visuelle (Bavelier et al., 2000, 2001; Bottari et al., 2011; Krumbholdz et al., 2005; Pavani et al., 2002). La plasticité intermodale est une forme de plasticité corticale qui se traduit par le recrutement d'une région corticale déficitaire en termes d'entrées sensorielles par

d'autres modalités sensorielles. Par exemple, le cortex auditif d'une personne sourde sera réutilisé pour du traitement visuel (Lomber et al., 2010).

L'impact de l'âge d'apparition de la cécité sur la neuroplasticité a également été soulevé pour la directionnalité de la hauteur d'un son (Gougoux et al., 2004) et la localisation de son monaural (Gougoux et al., 2005), suggérant qu'une privation visuelle à un âge précoce est en accord avec une plasticité intermodale. Cependant, bien qu'il y ait un recrutement du cortex occipital lors des tâches spatiales auditives, cette plasticité intermodale n'est pas toujours avantageuse, comme l'indique la corrélation négative trouvée chez des aveugles tardifs (Voss et al., 2004). La plasticité cérébrale est influencée par différents facteurs tels que l'âge d'apparition de la cécité et la présence de vision résiduelle (Schiffman, 2001). Il convient alors de distinguer dans les échantillons de participants si les individus sont aveugles de naissance (congénital), précoce (dans les premières années de vie) ou tardif (dans un âge plus avancé) afin d'avoir un portrait du phénomène de neuroplasticité des plus précis (Cohen et al., 2001).

La lecture en braille, qui nécessite des mouvements fins des doigts, a souvent été utilisée pour rendre compte de la modalité tactile chez les personnes aveugles. Des résultats montrent que certaines zones du cortex visuel normalement activées chez les voyants sont aussi activées chez des participants aveugles précoces et tardifs lors d'une lecture en braille (Burton et al., 2002). Les individus aveugles montrent également une acuité spatiale tactile du majeur et de l'index (Van Boven et al., 2000), ainsi qu'une acuité tactile passive (Goldreich et Kanics, 2003) supérieures lors de tâche de discrimination d'orientation de réseau (tâche qui permet de déterminer l'acuité tactile). Ces résultats démontrent ainsi l'hypothèse de plasticité intermodale dans la modalité tactile. En faveur d'une supériorité de discrimination dans les orientations de réseau chez les aveugles, Norman et Bartholomew (2011) soulèvent une meilleure performance dans une tâche de discrimination de forme 3D. Cette différence n'est cependant pas trouvée chez les aveugles congénitaux., suggérant qu'un certain degré de vision est sûrement nécessaire pour le traitement de forme 3D (Norman et Bartholomew 2011). Une interprétation possible de l'hyperacuité hyperacuité tactile chez les individus aveugles repose sur l'expérience spécifique de la lecture en braille (Grant et al., 2000). En effet, ces auteurs n'ont pas obtenus de différence dans

la discrimination dépendante de l'acuité spatiale d'orientation de réseau ou lorsque les crêtes des symboles différaient.

Concernant la modalité olfactive, divers facteurs tels que le seuil olfactif, la discrimination, l'identification et la localisation d'odeurs peuvent être au cœur d'une investigation expérimentale. Tout d'abord, le seuil olfactif est défini comme la plus faible concentration d'odorants permettant de détecter une odeur (Stevens, 1961) et fait souvent référence à la sensibilité aux odeurs. Le Sniffin' Stick test (SST ; Hummel et al., 1998, 2007) est l'outil le plus couramment utilisé en recherche moderne pour l'évaluer (Sorokowska et al., 2018). Certains auteurs ont identifié des seuils olfactifs plus élevés chez des participants aveugles comparés au groupe contrôle (Murphy et Cain, 1986), alors que d'autres n'ont pas trouvé de différence (Cornell Kärnekull et al., 2016; Luers et al., 2014; Schwenn et al., 2002; Sorokowska, 2016). Des performances inférieures aux voyants ont même été rapportées (Beaulieu-Lefebvre et al., 2011).

La discrimination par les odeurs représente la capacité à distinguer les odeurs entre elles et a été associée aux fonctions exécutives puisqu'elle nécessite de se représenter une odeur cible et d'être en mesure d'utiliser cette représentation à des fins de comparaisons et de sélection d'odeurs parmi des distracteurs (Hedner et al., 2010). Toujours au travers du SST, plusieurs études ont montré une absence d'effet de la cécité sur la discrimination d'odeurs (Albrecht et al., 2010; Beaulieu-Lefebvre et al., 2011; Luers et al., 2014; Manescu et al., 2018; Sorokowska, 2016).

L'identification est la capacité de nommer différentes odeurs. Cette composante peut être évaluée en présentant une odeur au participant qui doit identifier la bonne réponse entre un certain nombre d'alternatives d'odorants (rappel identifié) ou sans indication (sans rappel)(Rosenbluth et al., 2000). L'identification d'odeurs est très sensible aux manipulations effectuées durant l'administration du test de même qu'aux capacités verbales des participants (Larsson et al., 2004) et au contexte culturel (Sorokowska et al., 2018). À notre connaissance, aucune étude ne démontre une meilleure performance dans l'identification des odeurs détectées par rappel identifié entre des individus voyants et des aveugles, qu'ils soient jeunes ou adultes, congénitaux, précoces ou tardifs (Beaulieu-Lefebvre et al., 2011; Luers et al., 2014; Rosenbluth et al., 2000; Schwenn et al., 2002). Par contre, lorsque la tâche impliquait une identification sans

indication, la performance des enfants et des adultes aveugles précoces surpassait les contrôles voyants (Cuevas et al., 2009; Rosenbluth, et al., 2000). Gagnon et collaborateurs (2015) ont d'ailleurs démontré une meilleure identification d'odeurs par voie orthonasale chez des aveugles congénitaux, mais ces résultats n'étaient pas présents pour la voie rétronasale. Comme cette composante est très peu explorée, d'autres recherches seront nécessaires pour appuyer ces trouvailles.

Enfin, la localisation d'odeurs est la capacité à déterminer dans quelle narine l'odorant est administré (Koutsoklenis et Papadopoulos, 2011). En date d'aujourd'hui, aucune étude n'a évalué directement les capacités de localisation d'odeurs au sein de la population aveugle ou sourde. Pourtant, la localisation d'odeurs se base sur une stimulation du système trigéminal (Frasnelli et al., 2009; Kopal et al., 1989) et serait une tâche additionnelle intéressante.

En résumé, les résultats d'études portant sur les capacités olfactives semblent hétérogènes, et ce, tant dans des tâches sensorielles (par ex., seuil de détection olfactif) que des tâches impliquant des fonctions cognitives de plus haut niveau (par ex., identification des odeurs). Une méta-analyse de Sorokowska et collaborateurs (2018) a démontré que les capacités olfactives dans les conditions de seuil de détection, de discrimination et d'identification d'odeurs n'ont pas, dans l'ensemble, de différence dans la taille d'effet entre les aveugles et les voyants. Les auteurs rapportent que les résultats des études incluses étaient très hétérogènes en raison de plusieurs critères : (1) les définitions de la cécité qui diffèrent (2) un manque de contrôle des états de cécité (ex. congénital versus tardif), ainsi qu'une (3) nécessité à vérifier la présence de vision résiduelle. Comme Kupers et Ptito (2014) l'ont soulevé, la littérature sur la fonction olfaction souffre de lacunes. Bien qu'il soit admis qu'une privation sensorielle mène au développement des autres sens, ces effets compensatoires restent complexes (Kupers et Ptito, 2014). De nombreux facteurs influencent notamment les tâches en olfaction (par ex., âge, sexe, traits de personnalité, tabagisme, préférence pour une narine, médication, etc.). En plus, l'expérience d'une odeur n'est pas le résultat d'une simple entrée sensorielle et devrait être interprétée comme une interaction avec d'autres modalités (Seo et Hummel, 2017).

Dans le même ordre d'idée que la population souffrant de cécité, diverses études ont aussi rapporté que les individus sourds possèdent des supra-performances dans les autres modalités sensorielles intactes. Plus spécifiquement, les supra-performances concernent la diminution du seuil perceptif de détection visuelle, à la fois lorsque les stimuli sont présentés en vision centrale et périphérique (Bottari et al., 2010; Q. Chen et al., 2006; Codina et al., 2011; Colmenero et al., 2004; Hong Lore et Song, 1991; Neville et Lawson, 1987; Reynolds, 1993), mais également, la diminution du seuil de détection du mouvement visuel, de nouveau, lors d'une présentation en vision centrale et périphérique (Bavelier et al., 2000, 2001; Bosworth et Dobkins, 2002; Hauthal et al., 2013; Shiell et al., 2014). Ces supra-performances visuelles impliquent un recrutement du cortex auditif et appuient l'hypothèse d'un phénomène de plasticité cérébrale compensatoire de type intermodal entre les modalités auditive et visuelle (Bavelier et al., 2000, 2001; Bottari et al., 2011; Griffiths et Warren, 2002; Krumbholz et al., 2005; Pavani et al., 2002).

1.4 La fonction olfactive de la population sourde

À notre connaissance, seules deux études ont exploré les capacités olfactives des personnes sourdes par le biais d'évaluations psychophysiques et avaient, toutes deux, des résultats en défaveur de capacités olfactives accrues. Dans la première étude, neuf adultes présentant une déficience auditive profonde (cinq sourds post-linguaux) ont des performances olfactives amoindries lors du Munich Olfaction Test (performances en discrimination, seuil de détection et identification d'odeurs) (Diekmann et al., 1994). De plus, la diminution des entrées auditives (c.-à-d., boucher les oreilles) de 20 participants entendants n'a pas amélioré leur performance olfactive. Tous les participants sourds utilisaient préférentiellement la modalité orale comme moyen de communication. Parmi les limites de cette étude, les auteurs soulignent qu'un délai dans l'acquisition du langage aurait pu influencer les performances obtenues, notamment chez les sourds congénitaux. En effet, l'absence de mesures cognitives restreint la compréhension des résultats obtenus dans la mesure où l'efficacité intellectuelle n'est pas contrôlée et pourrait être à l'explication de moins bonnes performances (Diekmann et al., 1994).

La seconde étude rapporte également des performances significativement inférieures au Sniffin' Sticks test auprès de 13 adolescents sourds congénitaux, en comparaison à des individus

entendants et des individus aveugles dans les conditions de détection et de discrimination d'odeurs (Guducu et al., 2016). Par contre, ces résultats sont nuancés par les auteurs en raison d'une faible collaboration des individus sourds lors de la réalisation de la tâche, notamment au sein du sous-test d'identification d'odeurs pour lequel une faiblesse lexicale ou un manque d'équivalence en langue signée auraient pu amoindrir les performances obtenues chez les individus sourds. Par conséquent, la littérature actuelle n'appuie pas la présence d'une sensibilité et d'une acuité olfactive pouvant être accrue chez les personnes sourdes. En réponse à ces limitations méthodologiques, notre étude se démarque par ses tâches qui sont adaptées à la population sourde.

Quelques études ont permis d'identifier des capacités cognitives supérieures chez les individus sourds. Ainsi, il a été démontré que les sourds pouvaient présenter de meilleures capacités à orienter leur attention visuelle (Colmenero et al., 2004; Parasnis, I. et Samar, V. J., 1985). Par ailleurs, une étude suggère également que les sourds signeurs présenteraient de meilleures capacités lors de tâches de mémorisation spatiale en comparaison à des sourds non-signeurs et des entendants (Cattani et Clibbens, 2005). Ces atypies cognitives devront donc faire l'objet d'une évaluation afin de s'assurer que les performances olfactives obtenues ne sont pas mieux expliquées par des aptitudes cognitives atypiques.

D'ailleurs, divers facteurs confondants tels que les faibles échantillons évalués, leur hétérogénéité et l'absence de mesures cognitives contrôles limitent l'évaluation exhaustive des capacités olfactives de ces individus. De plus, plusieurs facteurs connus pour influencer la plasticité cérébrale des individus privés de la modalité auditive doivent être pris en considération dans de futures études, notamment la durée de la surdité ou encore la réhabilitation de l'audition par le biais d'un implant cochléaire (Kral et al., 2016).

1.5 Objectif

La présente étude vise à établir une évaluation exhaustive des capacités olfactives des individus sourds par le biais d'une évaluation psychophysique des processus de détection, d'identification, de discrimination et de localisation d'odeurs, en comparaison aux capacités olfactives d'individus entendants.

Afin de vérifier la fonction cognitive normale chez les participants sourds, nous avons administré une série de tests appropriés. Plus précisément, nous avons utilisé le test de la Figure Complexe de Rey-Osterrieth, les sous-tests Blocks et Matrix de l'échelle d'intelligence Wechsler II et le test Ruff 2 & 7. L'évaluation des capacités olfactives a été réalisée à l'aide du test adapté du « Sniffin' Sticks » (Hummel et al., 1997). Cette tâche comprend un ensemble de tiges conçues pour libérer les odeurs et nous permet d'évaluer le seuil de détection, de discrimination et d'identification des odeurs. Ensuite, nous avons utilisé un olfactomètre pour mesurer les capacités et la vitesse du participant à localiser et identifier les odeurs. L'olfactomètre, qui a déjà été validée auprès d'une population adulte en bonne santé (Frasnelli et al., 2009), délivre des stimuli olfactifs, tout en contrôlant précisément le moment de la délivrance, le niveau de concentration et la durée de la stimulation (Visschers et al., 2006). Les participants ont reçu deux types de stimulation olfactive; odorant d'eucalyptol (eucalyptus) et odorant de benzaldéhyde (amande). Les stimulations ont été délivrées par l'une des deux narines (gauche ou droite). Les participants ont reçu un ordre écrit: « Où?» ou "Quoi?". Ensuite, ils devaient localiser l'odeur ou l'identifier. Cette tâche consistait en 36 stimulations: 12 stimuli aériens (contrôle), 12 stimuli benzaldéhyde (amande) et 12 stimuli eucalyptol (eucalyptus).

1.6 Hypothèses

En écho aux phénomènes de plasticité cérébrale de compensation entre les modalités sensorielles, nous émettons l'hypothèse principale que la privation auditive entraîne des performances atypiques dans la modalité olfactive chez les individus sourds en comparaison à des individus entendants.

Plus spécifiquement, des supra-performances sont attendues chez les individus sourds congénitaux, à l'instar des performances visuelles et tactiles en comparaison aux performances olfactives chez les individus entendants.

Chapitre 2 – Article

Article: Preuves comportementales de capacités olfactives améliorées
chez les personnes sourdes

Rim Nazar¹, Catherine Landry¹, Marie Simon¹, Johannes Frasnelli^{1,2,3} et Franco Lepore¹

¹Neuropsychology and Cognition Research Center (CERNEC), Department of Psychology, F-480, Pavillon Marie-Victorin, Montreal University, 90 Av. Vincent- D’Indy, Montreal, Québec H2V 2S9, Canada.

²Research Center of the Sacré-Coeur Hospital of Montreal, 5400, boul. Gouin Ouest Montréal, Québec H4J 1C5, Canada.

³ Department of Anatomy, Université du Québec à Trois-Rivières, 3351 Boulevard des Forges, Trois-Rivières, QC G8Z 4M3, Canada.

Résumé

La privation sensorielle, et tout particulièrement la déficience auditive, s'avère un excellent modèle théorique pour étudier les phénomènes de neuroplasticité dans le cerveau humain ainsi que les comportements adaptatifs qui se manifestent afin de soutenir le quotidien des individus privés d'une modalité sensorielle. Pour s'adapter à leur handicap, les individus sourds se reposent quotidiennement sur leurs autres sens restés intacts. Les éléments de preuves les plus cohérents dans la littérature sont en faveur de performances visuelles et tactiles supérieures chez les individus sourds profonds congénitaux. Dans cette étude, nous souhaitons explorer les habiletés olfactives chez les individus sourds congénitaux. Pour cela, nous avons évalué de façon exhaustive les capacités olfactives de 11 individus sourds congénitaux par le biais de tâches psychophysiques portant sur les processus de détection, d'identification, de discrimination et de localisation d'odorants, en comparaison à 11 individus neurotypiques. Le test du Sniffin'Sticks et le test de l'olfactomètre ont été utilisés afin d'identifier de potentielles différences de performance olfactive entre les deux populations. Les résultats démontrent que la privation auditive entraîne des performances supérieures au niveau de la modalité olfactive chez les individus sourds congénitaux en comparaison à des individus neurotypiques.

Mots-clés : Olfaction, Sourds Congénitaux, Neuroplasticité, Privation sensorielle, Adaptation.

Abstract

Sensory deprivation, and particularly hearing impairment, is an excellent theoretical model for studying the phenomena of neuroplasticity in the human brain, as well as the adaptive behaviors available in order to support the daily lives of individuals deprived of a sensory modality. To adapt to their handicap, deaf individuals rely daily on their other senses that have remained intact. Evidence from literature has consistently supported superior visual and tactile performance in congenitally deaf individuals. In this study, we explored olfactory skills in congenitally deaf individuals. For this, we evaluated the olfactory capacities of 11 congenitally deaf individuals through psychophysical tasks relating to the processes of detection, identification, discrimination and localization of odors, in comparison with 11 hearing individuals. The Sniffin' Sticks test and an olfactometer were used to identify potential differences in olfactory performance between the two groups. The results demonstrated that hearing deprivation leads to superior performance in terms of olfactory modality in congenitally deaf individuals compared to hearing individuals.

Keywords: Olfaction, Congenital Deaf, Neuroplasticity, Sensory Deprivation, Adaptation.

2.1 Introduction

One way to study the phenomenon of neuroplasticity in the human brain, as well as adaptive behavior, is through sensory deprivation. To support the daily life of individuals deprived of a sensory modality (such as hearing), adaptive behaviors are created. More specifically, to adapt to their disability, deaf individuals rely daily on their other senses that have remained intact (Voss, 2018). As a result, several studies took interest in identifying sensory abilities that may become enhanced in deaf individuals compared to hearing individuals. Various animals (Lomber et al., 2010) or behavioral studies (Alencar et al., 2019) and even brain imaging studies (Vachon et al., 2013), are in favor of enhanced visual performances in congenitally deaf individuals. More specifically, improved performances have been found in deaf individuals, related to a reduction in the perceptual threshold of visual detection for central and peripheral vision (Codina et al., 2011; Reynolds, 1993). Also, a decrease in the threshold detection of visual movement has been found when presenting stimuli in central and peripheral vision (Bavelier et al., 2001; Hauthal et al., 2013). These enhanced visual performances involve recruitment of the auditory cortex and support the hypothesis of a compensatory brain plasticity phenomenon of intermodal type between the auditory and visual modalities (Bavelier et al., 2000, 2001; Griffiths et Warren, 2002). Moreover, it has been shown that auditory regions associated with linguistic processing are recruited for tactile processing as well as linguistic and non-linguistic visual processing in deaf people (Merabet et Pascual-Leone, 2010). Indeed, an expansion of the most active regions of the brain or pathways occurs at the expense of other regions or pathways. Thus, in this competitive system, sensory deprivation will accelerate the expansion of a competing path (Rauschecker, 1995). These changes have been found in both the brain regions that process the remaining sensory modalities and the regions that normally process the lost sense (Rauschecker, 1995). Also, numerous studies have demonstrated increased tactile performance in deaf individuals during behavioral protocols (Cranney et Ashton, 1982; Frenzel et al., 2012; Levänen et Hamdorf, 2001). The increased tactile sensitivity in deaf individuals would also involve the recruitment of the auditory cortex and suggests a phenomenon of intermodal plasticity between the auditory and tactile modalities (Auer et al., 2007; Karns et al., 2012). A few studies have identified higher cognitive abilities in deaf individuals. Thus, it has been demonstrated that deaf individuals may

have better abilities to direct their visual attention (Colmenero et al., 2004; Parasnis et Samar, 1985). Furthermore, a study suggests that deaf signers have better abilities in spatial memorization tasks compared to signers deaf and hearing non-signers (Cattani et Clibbens, 2005). Thus, it seems necessary to ensure the initial cognitive specificities of participants are taken into consideration to more accurately monitor changes in olfactory performances obtained in deaf individuals throughout these studies.

To our knowledge, only two studies have explored the olfactory capacities of deaf individuals. Reduced performance during the Sniffin' Sticks test was found in nine adults with profound hearing impairment (five post-lingual deafness). The Sniffin' Sticks task includes a set of rods designed to release odors and allows us to evaluate the threshold detection (T), discrimination (D), and identification (I) of odors (Hummel et al., 1997). In this first study, all deaf participants preferentially used oral modality as a mean of communication (Diekmann et al., 1994). Reduced performance on the Sniffin' Sticks test was also found for 13 congenitally deaf adolescents, under conditions of detection and discrimination, compared to hearing individuals (Guducu et al., 2016). Currently, the literature does not support the presence of increased sensitivity and olfactory acuity in deaf individuals. However, several explanations are reported by the authors of these studies. Thus, Diekmann et al., (1994) suggested that a delay in language acquisition for deaf individuals could influence their performance in terms of understanding tasks, especially in congenitally deaf people. However, they reported the importance of controlling for cognitive measures since the initial intellectual efficiency of the deaf participants was not measured before the comparison was performed (Diekmann et al., 1994). In the second study, Guducu et al., (2016), reported a pattern of hyposmia in their group of deaf individuals. Indeed, out of the thirteen deaf participants in this study, there were only three participants with normosmia, so a TDI score judged to be normal, seven patients with hyposmia and two with anosmia. The literature assessing olfactory performances in this population is limited and has significant methodological limitations. The small samples evaluated, their heterogeneity, and the absence of cognitive measures are all confounding factors in the evaluation of the olfactory capacities of deaf individuals. In addition, several factors are known to influence the extent of cerebral plasticity in people deprived of hearing modality, such as the duration of deafness or the

rehabilitation of hearing by means of a cochlear implant (CI). Consequently, these factors must be taken into account in research protocols (Kral et al., 2016). In other sensory modalities, such as vision, it has been shown that blind individuals have enhanced performances in terms of hearing and olfactory modalities in comparison to sighted individuals (Cuevas et al., 2009; Voss et al., 2004). More specifically, the processes of identification and naming odors are significantly improved in individuals deprived of vision since birth (Cuevas et al., 2009; Murphy et Cain, 1986). These results are in favor of the phenomenon of cerebral plasticity as a compensation between the visual and olfactory modalities and support the hypothesis of a similar phenomenon between the auditory and olfactory modalities (Cuevas et al., 2010).

In this study, in addition to the Sniffin 'Sticks test that assess olfactory threshold as well as the ability to discriminate and identify odors, we applied an additional paradigm to automatically assess participants' ability to identify and localize odors, by means of an olfactometer, i.e., a device for automated delivery of odorants. Odor localization is feasible via the activation of the trigeminal system rather than the olfactory system (Frasnelli et al., 2009; Kobal et al. 1989). The trigeminal system is a third chemical sense, alongside smell and taste. It provides us with sensations such as burning, cooling, piquancy and spiciness of inhaled or ingested chemical (Frasnelli et Manescu, 2017). Unlike pure odorants that only activate the olfactory nerve, most odorants are mixed olfactory-trigeminal and thus stimulate both sensory systems. Odor localization, i.e., the determination of which nostril has been stimulated in a monorhinal stimulation paradigm, is only possible with odorants that also stimulate the trigeminal system (Frasnelli et al., 2009).

Within this study, we aim to establish an evaluation of the olfactory capacities of deaf individuals through a psychophysical evaluation of the processes of detection, identification, discrimination and localization of odors, in comparison to hearing individuals. In adherence to the phenomena of cerebral plasticity of compensation between sensory modalities, we issued the hypothesis that auditory deprivation leads to atypical performances in the olfactory modality in congenitally deaf individuals compared to hearing individuals. More specifically, as reported in the literature with visual and tactile performances, we expect superior olfactory performances in congenitally deaf individuals. Indeed, superior olfactory performances in the tasks of detection,

identification, discrimination and localization of odors are expected in congenitally deaf individuals in comparison to hearing individuals.

2.2 Method

This study took place between September 2019 and May 2020 and was approved by the Research Ethics Board of the Centre for Interdisciplinary Research in Rehabilitation of Greater Montréal (CRIR) and of the Sacré-Coeur Hospital.

2.2.1 Participants

We tested a total of 22 participants (14 women) as part of this research. A total of 11 individuals with severe to profound bilateral congenital hearing loss were matched by age and gender with 11 hearing participants. Among the 11 deaf individuals, five participants had a cochlear implant (CI) at the time of their participation. All participants were between the ages of 18 and 55 ($M = 35.64$, $SD = 9.57$) and had to have normal or corrected vision. Age has been specifically controlled considering the decline in olfactory capacity in normal aging (Doty et Kamath, 2014). Potential participants with psychiatric or neurological disorders (Kopala et al., 1994; Moscovitch et al., 2009), otolaryngology disease associated with olfactory dysfunctions (Landis et al., 2009) were excluded, as were smokers (Vennemann et al., 2008). We only aimed at investigating participants with a normal sense of smell (overall TDI score $\geq 31/48$). We excluded only one deaf participant because the participant failed to complete the task.

Participants were instructed to avoid eating an hour before the experience and not to use scented products. They gave their informed consent and received monetary compensation for their participation. Table 1 presents the characteristics of all the participants.

Table 1: *Characteristics of the participants in the sample - Detailed table*

Sample characteristics - Detailed table								
Audition	Age in years	Gender	Education in years	Language	Onset of deafness	Etiology	CI	CI wearing time in years
D	45	F	16	LSQ+ French	Congenital	sensorineural	Yes	42
H	46	F	11	French	N/A	N/A	N/A	N/A
D	47	M	9	French	Congenital	sensorineural	Yes	42
H	47	M	16	French	N/A	N/A	N/A	N/A
D	51	F	7	LSQ	Congenital	sensorineural	No	N/A
H	52	F	13	French	N/A	N/A	N/A	N/A
D	36	F	16	LSQ	Congenital	sensorineural	No	N/A
H	36	F	16	French	N/A	N/A	N/A	N/A
D	32	F	14	LSQ	Congenital	sensorineural	No	N/A
H	31	F	16	French	N/A	N/A	N/A	N/A
D	20	M	14	LSQ+ French	Congenital	sensorineural	Yes	18
H	20	M	14	French	N/A	N/A	N/A	N/A
D	35	M	16	LSQ	Congenital	sensorineural	No	N/A
H	34	M	14	French	N/A	N/A	N/A	N/A
D	28	M	16	French	Congenital	sensorineural	Yes	27
H	28	M	16	French	N/A	N/A	N/A	N/A
D	28	F	16	LSQ	Congenital	sensorineural	No	N/A
H	27	F	21	French	N/A	N/A	N/A	N/A
D	28	F	14	LSQ+ French	Congenital	sensorineural	Yes	24
H	26	F	18	French	N/A	N/A	N/A	N/A
D	42	F	11	LSQ	Congenital	sensorineural	No	N/A
H	45	F	12	French	N/A	N/A	N/A	N/A

Table 1 shows the detailed characteristics of the all participants in the sample. D = deaf individuals; H = hearing individuals; F = female; M = male; LSQ= Quebec sign language; CI= Cochlear Implant; N/A= not applicable

2.2.2 Procedure

Deaf participants were recruited through program managers and audiologists at the Raymond Dewar Institute in Montreal and through advertisements on billboards at this center. Subsequently, the hearing participants were recruited through advertisements on the University of Montreal billboards and on the Internet. The hearing participants were chosen according to their age and gender to allow matching with deaf individuals. Information related to hearing loss, medical history and demographic information was collected through emails to ensure compliance with the inclusion and exclusion criteria for this study. Then the consent form was explained and

signed by all participants. The olfactory and cognitive assessments were done at the Sacré-Coeur Hospital in Montreal.

To ensure an adequacy understanding of the tasks, an interpreter of the Quebec sign language (LSQ) translated the instructions for the tasks as well as the research protocol into LSQ. The interpreter was videotaped, and videos were presented to deaf participants using a touchpad. This process addresses potential communication breakdowns and promotes the optimal participation of deaf individuals.

In order to ascertain normal cognitive function in deaf participants, we administered a series of appropriate tests. Specifically, we used the Rey-Osterrieth Complex Figure test, the Blocks and the Matrix subtests of the Wechsler Abbreviated Scale of Intelligence II, and the Ruff 2 & 7 test.

- (1) We used the Rey-Osterrieth Complex Figure test to evaluate spatial memorization capacities and the visuo-constructive skills (Deborah & Jane, 1985). This test measures planning capacity, organizational skills and perceptual and motor functions (Deborah & Jane, 1985). In the first part, the subject must reproduce the figure placed in front of him (copy) and then the figure is withdrawn and, after three minutes, the subject is invited to reproduce the figure from memory (immediate recall). In the second part of this test, the participant is asked to reproduce the complex figure of memory after 20-30 minutes (delayed recall). Finally, the participant must identify all the shapes that were part of the complex figure from a list of 24 shapes.
- (2) We used the Blocks subtest of the Wechsler Abbreviated Scale of Intelligence II (Wechsler, 2013) to assess visuomotor skills. This test requires visuospatial skills and visuomotor coordination skills (Wechsler, 2013). The participant manipulates nine identically painted cubes (red and white) and must reproduce the patterns presented as quickly as possible.
- (3) We used the Matrix subtest of the Wechsler Abbreviated Scale of Intelligence II (Wechsler, 2013) to assess visuo-perceptual and logical reasoning skills (Wechsler, 2013). In this test, the goal is to choose from among the different response choices in which image completes a series of logical sequences.

(4) We used the Ruff 2 & 7 test to assess the ability to orient and maintain an adequate and stable level of efficiency throughout a visual activity (Ruff et al., 1992). This paper and pencil task included a series of 20 visual research essays. The participant must detect and cross out every two target digits, 2 and 7. In the 10 automatic detection trials, the target numbers are integrated into alphabetical letters serving as distractors. In the 10 controlled search trials, the target numbers are integrated with the other numbers serving as distractors. Correct results and errors are counted for each trial.

We compared the Z scores of congenitally deaf participants with the normative data of each test. Thus, all the scores obtained by deaf individuals were within the average when compared to the normative samples of the tests. Specifically, deaf participants had average performances during the immediate recall ($Z = -.067$), during the delayed recall ($Z = -0.6$), as well as for recognition ($Z = 0.2$) of the Rey-Osterrieth Complex Figure test, a Z score: 1.09 for the Blocks test and a Z score = 0.87 for the Matrix test, and obtained a score $Z = -0.6$ for accuracy and a score $Z = 0.24$ for speed of the Ruff 2 & 7 test.

2.2.3 Material

2.2.3.1 Questionnaires

Deaf participants completed two questionnaires concerning the history of their hearing impairment (etiology, age at which hearing started, duration of hearing loss, wearing a hearing aid), as well as information relating to their means of communication (age of exposure to language, level of spoken language, sign language). Deaf and hearing participants had to complete a questionnaire related to their education as well as demographic data including age, gender and manual laterality.

2.2.3.2 Olfactory assessment

The evaluation of the olfactory capacities was carried out using the adapted test of the “Sniffin’Sticks” (Hummel et al., 1997). This task includes a set of rods designed to release odors and allows us to evaluate the threshold detection (T), discrimination (D) and, identification (I) of odors.

- (1) To assess the detection threshold (T), 16 different concentrations of phenylethanol (rose odor) were used (Hummel & al. 2007). Each time, three sticks were presented in random order to the participant, two containing a solvent and the third containing the odorant. Participants were asked to identify the odorant in an ascending / descending staircase procedure (Hummel & al. 2007). The threshold was defined as the average of the last four stair turns.
- (2) To assess the odor discrimination task (D), three sticks were presented, and participants were asked to determine which of the three sticks smelled differently.
- (3) Finally, the identification (I) of odors was carried out using a multiple-choice task. We presented 16 sticks containing different smells and the participants must choose from a list of four choices (Hummel & al. 2007). Three scores ranging from 0 to 16 were obtained for each condition and the addition of these scores leads to a combined "TDI" score out of 48 (Wolfensberger, 2000).

A combined score from these three subtests (TDI) enable to list olfactory performance on a clinical scale: normosmia ($\text{TDI} \geq 31$), hyposmia ($15 < \text{TDI} < 31$) and anosmia ($\text{TDI} \leq 15$) (Hummel & al. 2007).

Next, we used an olfactometer was used to measure the participant's abilities and speed to localize and identify odors. The olfactometer delivers olfactory stimuli, while precisely controlling the time of delivery, the level of concentration and the duration of the stimulation (Visschers et al., 2006). Participants received two types of olfactory stimulation; [E] smell of eucalyptol (eucalyptus) and [A] smell of benzaldehyde (almond). Stimulations were delivered through one of the two nostrils ([L] left or [R] right). Participants received a written order: "Where?" or "What?". Then, they had to locate the odor (L or R) or identify it (E or A) and press the response button as quickly as possible. The "Where?" command was a localization task and the "What?" command was an identification task. This task consisted of 36 stimulations: 12 air stimuli (control), 12 benzaldehyde (almond) and 12 eucalyptol (eucalyptus) stimuli. This task has previously been validated with a healthy adult population (Frasnelli et al., 2009).

2.3 Statistical analyses

All variables followed a normal distribution (Kolmogorov-Smirnov test for normality, $p > .05$). To find out if our two groups were different in terms of olfactory scores, we first performed an analysis on the scores obtained on the three Sniffin' Sticks subtasks. A repeated measures (rm) ANOVA was performed with *group* (2 levels: deaf, hearing) as between subject factor (bsf) and *task* (3 levels: detection, discrimination, identification) as within subject factor (wsf). We used age as a covariate for this analysis.

We next analyzed the data on odor identification and localization. We carried out two rm ANOVAs (ANOVA 1: accuracy; ANOVA 2: speed) with *group* (2 levels: deaf, hearing) as bsf and *task* (2 levels: identification, localization) as wsf. Again, the age of the participants served as a covariate.

Further, we used the Mann-Whitney U test to compare deaf individuals wearing a CI with deaf individuals who have never worn a CI.

2.4 Results

2.4.1 Sniffin' Sticks: Threshold detection, discrimination and identification

The mean scores for the Sniffin 'Sticks test for the identification, discrimination, threshold detection tasks and for the overall TDI are presented in Table 2.

Table 2: Mean scores for the Sniffin 'Sticks tasks and for the overall TDI

Tasks	Deaf		Hearing		P Value
	M	SD	M	SD	
Discrimination	13.82	1.08	12.09	2.07	0.023
Identification	14.27	1.10	12.91	1.51	0.025
Threshold detection	12.07	1.83	11.20	1.98	0.300
TDI score	40.16	3.20	36.20	3.41	0.011

Table 2 shows the mean scores for the Sniffin 'Sticks test for the identification, discrimination, threshold detection tasks and for the overall TDI.

The rm ANOVA yielded a significant effect of *group*, ($F(1,19) = 9.351$; $p = 0.006$, $\eta^2 = 0.33$), as well that a significant effect of *age* ($F(1,19) = 4.797$; $p = 0.041$, $\eta^2 = 0.20$).

Figure 2 shows the performance scores (group average) on the three subtests of the Sniffin' Sticks test and the overall TDI score.

Figure 2: Sub-tests and overall TDI score of the Sniffin' Sticks test.

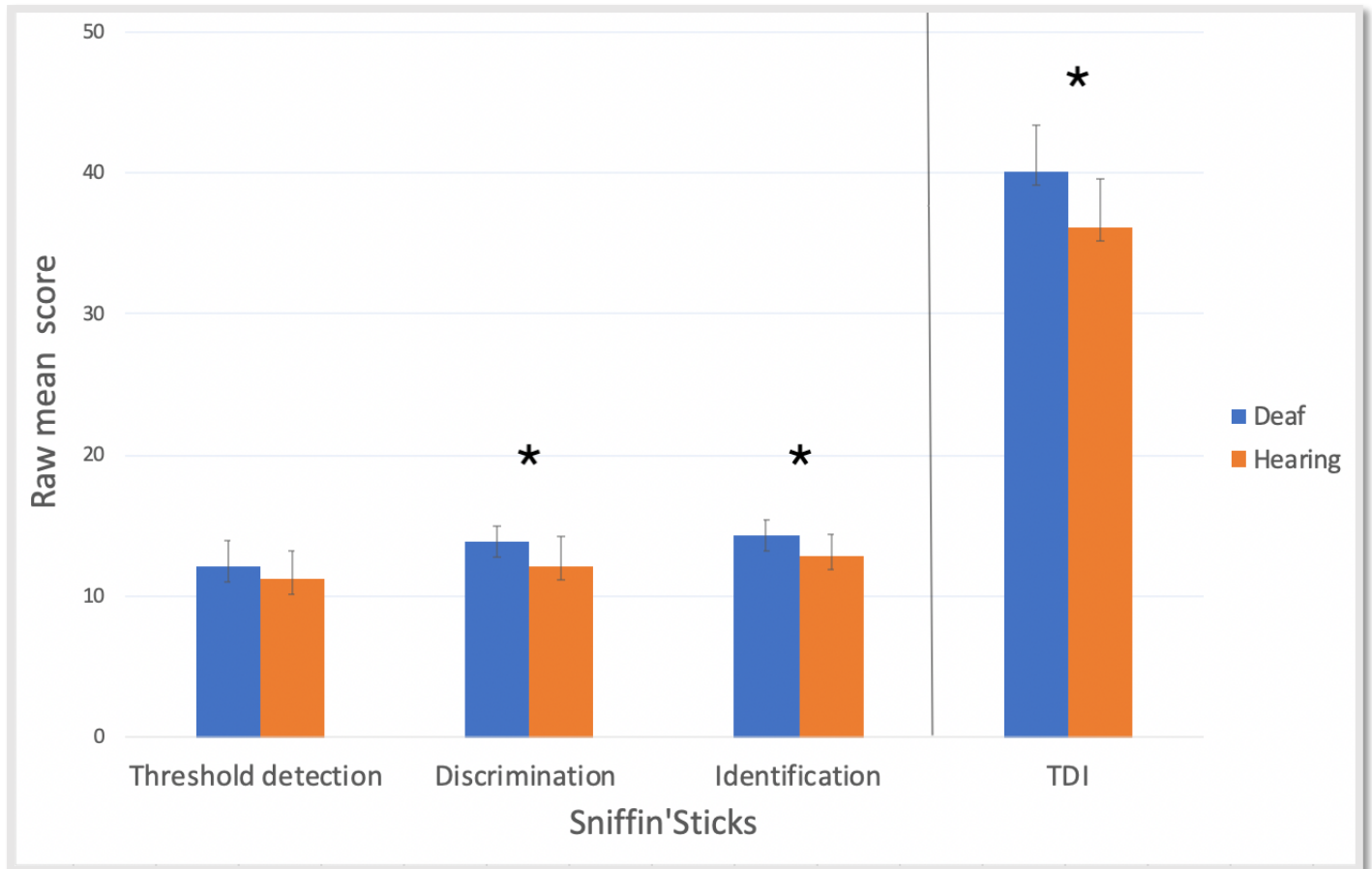


Figure 2 shows the raw mean scores for the three Sniffin' Sticks subtests and the overall composite score for detection, discrimination and identification (TDI). * = $p < 0.05$

2.4.2 Accuracy and speed for odor localization and identification

Accuracy

The mean accuracy scores of the olfactometer localization and identification tasks are presented in Table 3. The olfactometer delivers olfactory stimuli and participants are given the written

command: “Where?” or “What?”, they must press the answer button and the number of correct answers constitutes the participant's accuracy.

Table 3: Mean scores of the accuracy for the localization and the identification tasks; Olfactometer

Accuracy for the tasks:	Deaf		Hearing		P Value
	M	SD	M	SD	
Localization "where"	0.693	0.240	0.523	0.243	0.113
Identification "What"	0.898	0.094	0.727	0.243	0.042

Table 3 shows the raw mean scores in response accuracy for the two sub-tasks of the olfactometer test; localization and identification.

The rm ANOVA revealed a significant of *group* ($F(1,19) = 6.175; p = 0.022 \eta^2 = 0.245$). Figure 3 shows the raw scores for the accuracy of response of the two subtasks of the olfactometer test (identification and location).

Figure 3: Accuracy of the two sub-tasks of the olfactometer test

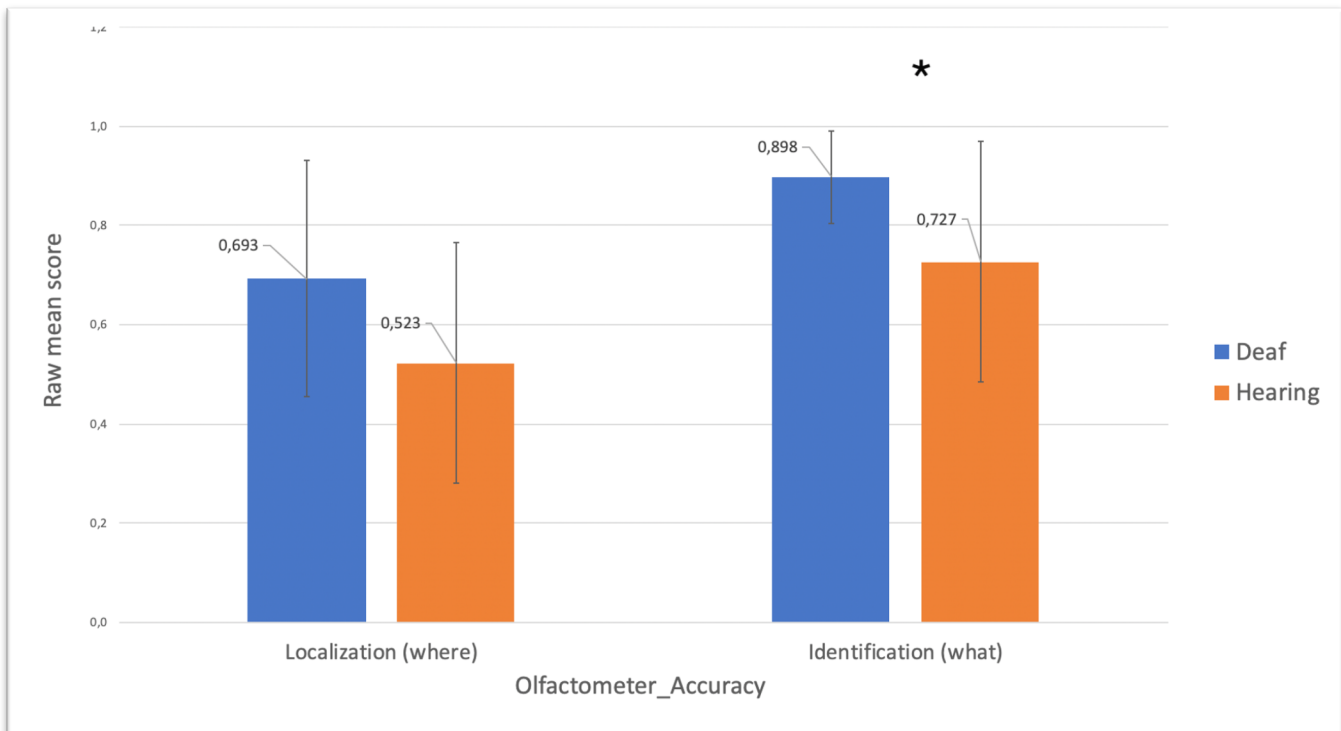


Figure 3 shows the raw mean scores in response accuracy for the two sub-tasks of the olfactometer test. * = $p < 0.05$

Response times (RTs)

The RTs for the tasks of localization and identification of the olfactometer are presented in Table 4. The olfactometer delivers olfactory stimuli, while precisely controlling the time of delivery. After the participants received the written order: "Where?" or "What?", they had to press the response button as quickly as possible and the RTs was obtained in second.

Table 4: Mean scores of the RTs for the localization and the identification tasks; Olfactometer

RTs for the tasks:	Deaf		Hearing		P Value
	M	SD	M	SD	
Localization "where"	1.86	0.44	2.39	0.69	0.041
Identification "What"	1.77	0.33	2.07	0.86	0.043

Table 4 shows the raw response times (RTs) mean scores **in seconds** for the two subtasks of the olfactometer test; localization and identification.

The rm ANOVA revealed a significant of *group* ($F(1,19) = 7.718; p = 0.012 \eta^2 = 0.12$) and *age* ($F(1,19) = 6.439; p = 0.02 \eta^2 = 0.253$).

Figure 4 shows the raw scores in seconds for the RTs of the two subtests of the olfactometer test (identification and localization).

Figure 4: RTs of the two sub-tasks of the olfactometer test

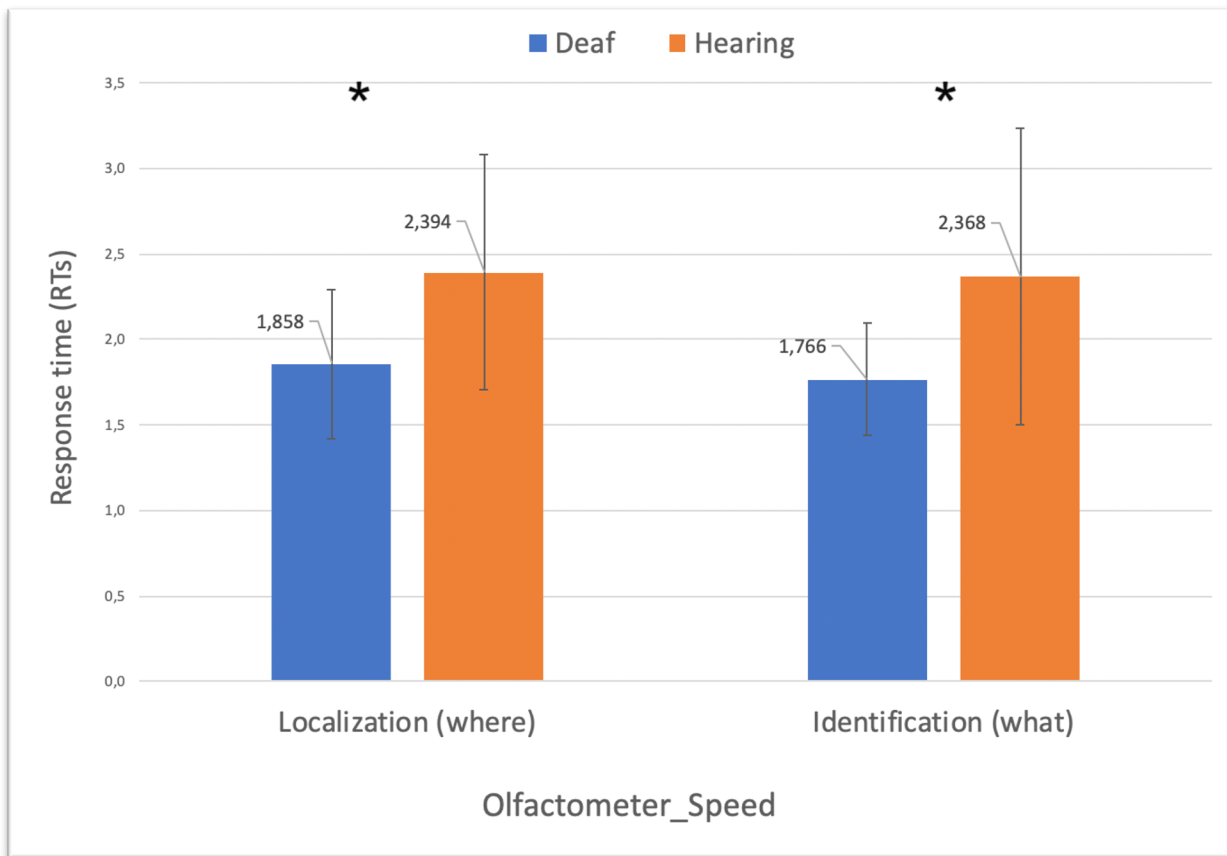


Figure 4 shows the raw response times (RTs) scores in seconds for the two subtasks of the olfactometer test. * = $p < 0.05$

2.4.3 Effect of cochlear implant

We used the Mann-Whitney U test to evaluate whether individuals with or without a cochlear implant differed on any measure. We did not observe any group difference between individuals with and without CI on the Sniffin' Sticks test, ($U = 13.5$, $p = 0.784$) or the measures assessed with the olfactometer (RTs of the localization task ($U = 14$, $p = 0.855$); identification task ($U = 7$, $p = 0.144$); accuracy of the localization task ($U = 10$, $p = 0.349$); identification task ($U = 10$, $p = 0.325$)).

2.5 Discussion

The main objective of this study was to assess the olfactory capacities of individuals with severe to profound bilateral congenital hearing loss and to compare them with hearing individuals. The results show enhanced abilities in the olfactory modality in congenitally deaf individuals compared to hearing individuals. More specifically, we found a positive effect of deafness on olfactory capacities, similar to visual and tactile performances presented in previous studies (Auer et al., 2007; Bavelier et al., 2000, 2001; Codina, et al., 2011; Cranney, & Ashton, 1982; Frenzel et al., 2012; Griffiths & Warren, 2002; Hauthal, et al., 2013; Karns et al., 2012; Reynolds, 1993).

2.5.1 Olfactory function and neuroplasticity

The results suggest a compensatory behavioral phenomenon between the auditory and olfactory modalities. Deaf participants obtained better results than hearing individuals for the overall TDI olfactory measurement of the Sniffin' Sticks test, and in the subtests evaluating the ability to discriminate and identify odors. In contrast, deaf individuals were not better in detecting odorants or localizing them. Nevertheless, deaf participants were faster to identify and localize odorants. This improved performance in deaf participants is obtained while in terms of cognitive measurements, they show no deviation from the norm in terms of attention, visual memory and fluent reasoning. These results are in contrast with previous studies which found reduced olfactory capacities in deaf individuals using the same or different tools (Diekmann et al., 1994; Guducu et al., 2016).

The major difference between our and the earlier reports is that we exclusively included individuals deprived of hearing at an early age. Several studies have shown the existence of a critical period at the start of postnatal life during which the brain is most receptive to change (Oberman & Pascual-Leone, 2013). Indeed, the age of onset of deafness appears to influence connectivity and an early auditory deprivation may affect the neural processing of visual information (Alencar et al., 2019). Also, early-deaf individuals show enhanced responses to faces in a specific region of the auditory cortex (Benetti et al., 2017). Previous researches on crossmodal plasticity in deaf individuals have focused on vision. For example, deaf individuals are faster and more accurate in detecting a target that is presented in the periphery than hearing individuals

and they have better visual attention (Hong Lore & Song, 1991; Neville & Lawson, 1987). In addition, recent studies in functional imaging and psychophysics converge in the direction of specific improved visual abilities in the deaf individual (Alencar et al., 2019). Cortical regions undergoing intermodal plasticity are believed to be responsible for mediating higher visual functions. Alencar et al (2019) list various studies on central visual functions that are improved in deaf people compared to hearing participants including object and face discrimination and peripheral visual functions (ex. motion detection, visual localization, visuomotor synchronization and the acuity perceived in the periphery). This increasing visual attention and the speed of target detection in deaf individuals could explain the faster performance odor localization and identification. Indeed, if deaf participants have better visual attention and are known to detect targets faster, they may have been more alert for the appearance of the written commands (where and what) of the test. In general, the results suggest that the intermodal reorganization of the auditory cortex of deaf individuals may be the source of the superior visual results reported. As these effects have been found in the visual modality, the main hypothesis of this article has been put forward in relation to this phenomenon of intermodal plasticity which, through other sensory modalities, would also result in superior performance in olfaction in deaf individuals. It is recognized that these intermodal changes underlie adaptive and compensatory behaviors (Merabet & Pascual-Leone, 2010). Moreover, cerebral reorganization would also appear as an adaptive strategy used by the nervous system to achieve homeostasis, i.e. the capacity of a system to maintain the balance of its internal environment (Singh et al., 2018). Thus, a loss of sensory modality would be compensated with an additional contribution of neuronal resources to the remaining sensory flows (Singh et al., 2018). This explains the results obtained on odor scores by deaf individuals in the context of our research. Indeed, if we consider the principle of cerebral reorganization and the phenomenon of intermodal plasticity which results in superior performance during sensory deprivation, we can consider the results obtained to be "normal" or even adaptive; smell would be improved in deaf individuals to compensate for hearing deprivation.

However, there was no significant difference in accuracy scores between the two groups on the olfactometer localization task. Nevertheless, correct localization of odors is achieved by

an odorant that triggers the trigeminal system (Frasnelli et al., 2009). Indeed, unlike pure odorants, stimuli activating the trigeminal system can be localized by humans (Frasnelli et al., 2009). The odors used in the olfactometer test; eucalyptol odor (eucalyptus) and benzaldehyde odor (almond) both, have a trigeminal quality and both activated the trigeminal system. The scores obtained demonstrate significant results for odor identification on the olfactometer test, but no significant difference for localization. These results suggest that indeed the olfactory system is improved in deaf individuals, but not the trigeminal system.

2.5.2 Impact of Cochlear implants (CI)

Of the eleven deaf participants, five individuals were wearing a CI at the time they were tested. We compared these five participants with the rest of the sample and found no significant differences between participants who wore a CI and those who did not. Studies have shown that there is a critical period for developing hearing skills, which is limited to the first years of life (before two years; Svirsky et al., 2004) (Robbins et al., 2004). This critical period must be respected to ensure the beneficial effect of the CI on oral and auditory skills and on intermodal reorganization (Green et al., 2007; Kral et al., 2005; Lee et al., 2017; Sharma et al., 2005). However, only two of our five participants with CI were implanted before the age of two. This could explain why we do not observe a difference between individuals with CI and the ones without.

2.5.4 Limits of the study and futures directions

Future studies should include a larger sample to examine the relationship between deafness and olfactory abilities and, should perform cognitive assessments in the two groups to better compare the intergroup profiles. It is possible that with a larger sample and with deaf individuals implanted before the critical period, that participants wearing a CI would have obtained different scores. It would, therefore, be appropriate to add a third group which includes individuals who have had a CI since at least the age of two. Finally, as we mentioned above, the results obtained within the framework of this study allow us to think that there may be a phenomenon of cerebral plasticity of compensatory type between the auditory and olfactory modalities. However, to confirm its

existence and observe the cortical changes brought by sensory deprivation, it would be necessary to assess this claim with further neuroimaging techniques.

2.6 Conclusion

The main findings of this study are that, compared to controls, people with severe to profound bilateral congenital hearing loss were better at discriminating and identifying odors on the Sniffin'Sticks test. They were also faster in localizing and identifying odorants. These conclusions are a step towards a better understanding of sensory modalities during hearing loss and are in favor of a phenomenon of cerebral plasticity of compensation between the auditory and olfactory modalities.

Disclosure

The authors do not report a conflict of interest. The authors are solely responsible for the content and the writing of the article. The present study was supported by the Chaire de Recherche of D^r. Franco Lepore.

RÉFÉRENCES - Article

Alencar, D. C. C., Blake, E. B., & Lomber, S. G. (2019). What and How the Deaf Brain Sees. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 31(8), 1089-1109. https://doi.org/doi:10.1162/jocn_a_01425

Auer, E. T., Bernstein, L. E., Sungkarat, W., & Singh, M. (2007). Vibrotactile activation of the auditory cortices in deaf versus hearing adults. *Neuroport*, 18(7), 645-648. <https://doi.org/10.1097/WNR.0b013e3280d943b9>

Bavelier, D., Brozinsky, C., Tomann, A., Mitchell, T., Neville, H. J., & Liu, G. (2001). Impact of early deafness and early exposure to sign language on the cerebral organization for motion processing. *The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 21(22), 8931-8942. <https://doi.org/21/22/>

Bavelier, D., Tomann, A., Hutton, C., Mitchell, T., Corina, D., Liu, G., & Neville, H. J. (2000). Visual attention to the periphery is enhanced in congenitally deaf individuals. *Journal of Neuroscience*, 20(17), 1-6.

Benetti, S., Van Ackeren, M. J., Rabini, G., Zonca, J., Foa, V., Baruffaldi, F., Rezk, M., Pavani, F., Rossion, B., & Collignon, O. (2017). Functional selectivity for face processing in the temporal voice area of early deaf individuals. *PNAS*, 114(31), E6437-E6446. <https://doi.org/10.1073/pnas.1618287114>

Cattani, A., & Clibbens, J. (2005). Atypical lateralization of memory for location : Effects of deafness and sign language use. *Brain and Cognition*, 58(2), 226-239. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2004.12.001>

Codina, C., Buckley, D., Port, M., & Pascalis, O. (2011). Deaf and hearing children : A comparison of peripheral vision development. *Developmental Science*, 14(4), 725-737. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2010.01017.x>

Colmenero, J. M., Catena, A., Fuentes, L. J., & Ramos, M. M. (2004). Mechanisms of visuospatial orienting in deafness. *European Journal of Cognitive Psychology*, 16(6), 791-805. <https://doi.org/10.1080/09541440340000312>

Cranney, J., & Ashton, R. (1982). Tactile spatial ability : Lateralized performance of deaf and hearing age groups. *Journal of Experimental Child Psychology*, 34(1), 123-134. [https://doi.org/10.1016/0022-0965\(82\)90035-2](https://doi.org/10.1016/0022-0965(82)90035-2)

Cuevas, I., Plaza, P., Rombaux, P., Collignon, O., De Volder, A. G., & Renier, L. (2010). Do People who Became Blind Early in Life Develop a Better Sense of Smell? A Psychophysical Study. *Journal of Visual Impairment & Blindness*, 104(6), 369-379. <https://doi.org/10.1177/0145482X1010400607>

Cuevas, I., Plaza, P., Rombaux, P., De Volder, A. G., & Renier, L. (2009). Odour discrimination and identification are improved in early blindness. *Neuropsychologia*, 47(14), 3079-3083. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.07.004>

Deborah, P. W., & Jane, M. H. (1985). Assessing children's copy productions of the Rey-Osterrieth complex figure. *Journal of clinical and experimental neuropsychology*, 7(3), 264-280. <https://doi.org/DOI: 10.1080/01688638508401259>

Diekmann, H., Walger, M., & von Wedel, H. (1994). [Sense of smell in deaf and blind patients]. *HNO*, 42(5), 264-269.

Doty, R. L., & Kamath, V. (2014). The influences of age on olfaction : A review. *Frontiers in Psychology*, 5. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00020>

Frasnelli, J., Charbonneau, G., Collignon, O., & Lepore, F. (2009). Odor Localization and Sniffing. *Chemical Senses*, 34(2), 139-144. <https://doi.org/10.1093/chemse/bjn068>

Frasnelli, J., & Manescu, S. (2017). The Intranasal Trigeminal System. In A. Buettner (Éd.), *Springer Handbook of Odor* (p. 113-114). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26932-0_46

Frenzel, H., Bohlender, J., Pinsker, K., Wohlleben, B., Tank, J., Lechner, S. G., Schiska, D., Jaijo, T., Rüschemdorf, F., Saar, K., Jordan, J., Millán, J. M., Gross, M., & Lewin, G. R. (2012). A Genetic Basis for Mechanosensory Traits in Humans. *PLOS Biology*, *10*(5), e1001318. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001318>

Green, K. M. J., Bhatt, Y. M., Mawman, D. J., O'Driscoll, M. P., Saeed, S. R., Ramsden, R. T., & Green, M. W. (2007). Predictors of Audiological Outcome Following Cochlear Implantation in Adults. *Cochlear Implants int.*, *8*(1), 1-11. <https://doi.org/10.1179/cim.2007.8.1.1>

Griffiths, T. D., & Warren, J. D. (2002). The planum temporale as a computational hub. *Current Biology*, *25*(7), 348-353.

Guducu, C., Oniz, A., Ikiz, A. O., & Ozgoren, M. (2016). Chemosensory Function in Congenitally Blind or Deaf Teenagers. *Chemosensory Perception*, *9*(1), 8-13. <https://doi.org/10.1007/s12078-015-9199-2>

Hauthal, N., Sandmann, P., Debener, S., & Thome, J. D. (2013). Visual movement perception in deaf and hearing individuals. *Advances in Cognitive Psychology*, *9*(2), 53-61. <https://doi.org/doi:10.2478/v10053-008-0131-z>

Hong Lore, W., & Song, S. (1991). Central and peripheral visual processing in hearing and nonhearing individuals. *Bulletin of the Psychonomic Society*, *29*(5), 437-440. <https://doi.org/10.3758/bf03333964>

Hummel, T., Kobal, G., Gudziol, H., & Mackay-Sim, A. (2007). Normative data for the “Sniffin’ Sticks” including tests of odor identification, odor discrimination, and olfactory thresholds : An upgrade based on a group of more than 3,000 subjects. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 264(3), 237-243. <https://doi.org/10.1007/s00405-006-0173-0>

Hummel, T., Sekinger, B., Wolf, S. R., Pauli, E., & Kobal, G. (1997). ‘Sniffin’ Sticks’ : Olfactory Performance Assessed by the Combined Testing of Odor Identification, Odor Discrimination and Olfactory Threshold. *Chemical Senses*, 22(1), 39-52. <https://doi.org/10.1093/chemse/22.1.39>

Karns, C. M., Dow, M. W., & Neville, H. J. (2012). Altered cross-modal processing in the primary auditory cortex of congenitally deaf adults : A visual-somatosensory fMRI study with a double-flash illusion. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 32(28), 9626-9638. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.6488-11.2012>

Kobal, G., Van Toller, S., & Hummel, T. (1989). Is there directional smelling? *Experientia*, 45(2), 130-132. <https://doi.org/10.1007/BF01954845>

Kopala, L. C., Good, K. P., & Honer, W. G. (1994). Olfactory hallucinations and olfactory identification ability in patients with schizophrenia and other psychiatric disorders. *Schizophrenia Research*, 12(3), 205-211. [https://doi.org/10.1016/0920-9964\(94\)90030-2](https://doi.org/10.1016/0920-9964(94)90030-2)

Kral, A., Kronenberger, G. W., Pisoni, B. D., & O’Donoghue, M. G. (2016). Neurocognitive factors in sensory restoration of early deafness : A connectome model. *The Lancet. Neurology*, 15(6), 610-621. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(16\)00034-X](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(16)00034-X)

Kral, A., Tillein, J., Heid, S., Hartmann, R., & Klinke, E. (2005). Postnatal Cortical Development in Congenital Auditory Deprivation. *Cerebral Cortex*, 15(5), 552-562. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhh156>

Landis, B. N., Konnerth, C. G., & Hummel, T. (2009). A Study on the Frequency of Olfactory Dysfunction. *The Laryngoscope*, *114*(10). <https://doi.org/10.1097/00005537-200410000-00017>

Lee, H.-J., Giraud, A.-L., Eunjoon, K., Oh, S.-H., Kang, H., Kim, C.-S., & Lee, D. S. (2017). Cortical Activity at Rest Predicts Cochlear Implantation Outcome. *Cerebral Cortex*, *17*(4), 909-917. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhl001>

Levänen, S., & Hamdorf, D. (2001). Feeling vibrations : Enhanced tactile sensitivity in congenitally deaf humans. *Neuroscience Letters*, *301*(1), 75-77. [https://doi.org/10.1016/S0304-3940\(01\)01597-X](https://doi.org/10.1016/S0304-3940(01)01597-X)

Lomber, S. G., Meredith, A. M., & Kral, A. (2010). Cross-modal plasticity in specific auditory cortices underlies visual compensations in the deaf. *Nature Neuroscience*, 1421-1427.

Merabet, L. B., & Pascual-Leone, A. (2010). Neural reorganization following sensory loss : The opportunity of change. *Nature Reviews Neuroscience*, *11*, 44-52. <https://doi.org/10.1038/nrn2758>

Moscavitch, S.-D., Szyper-Kravitz, M., & Schoenfeld, Y. (2009). Autoimmune pathology accounts for common manifestations in a wide range of neuro-psychiatric disorders : The olfactory and immune system interrelationship. *Clinical Immunology*, *130*(3), 235-243. <https://doi.org/10.1016/j.clim.2008.10.010>

Murphy, C., & Cain, W. S. (1986). Odor identification : The blind are better. *Physiology & Behavior*, *37*(1), 177-180. [https://doi.org/10.1016/0031-9384\(86\)90402-6](https://doi.org/10.1016/0031-9384(86)90402-6)

Neville, H. J., & Lawson, D. (1987). Attention to central and peripheral visual space in a movement detection task : An event-related potential and behavioral study. II. Congenitally deaf adults. *Brain Research*, *405*(2), 268-283. [https://doi.org/10.1016/0006-8993\(87\)90295-2](https://doi.org/10.1016/0006-8993(87)90295-2)

Oberman, L., & Pascual-Leone, A. (2013). Chapter 4 - Changes in Plasticity Across the Lifespan : Cause of Disease and Target for Intervention. In M. M. Merzenich, M. Nahum, & T. M. Van Vleet (Éds.), *Progress in Brain Research* (Vol. 207, p. 91-120). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63327-9.00016-3>

Parasnis, I., & Samar, V. J. (1985). Parafoveal attention in congenitally deaf and hearing young adults. *Brain and Cognition*, 4(3), 313-327. [https://doi.org/10.1016/0278-2626\(85\)90024-7](https://doi.org/10.1016/0278-2626(85)90024-7)

Rauschecker, J. P. (1995). Compensatory plasticity and sensory substitution in the cerebral cortex. *Trends in Neurosciences*, 18(1), 36-43.

Reynolds, H. (1993). Effects of Foveal Stimulation on Peripheral Visual Processing and Laterality in Deaf and Hearing Subjects. *The American Journal of Psychology*, 523-540.

Robbins, A. M., Koch, D. B., Osberger, M. J., Zimmerman-Phillips, S., & Kishon-Rabin, L. (2004). Effect of Age at Cochlear Implantation on Auditory Skill Development in Infants and Toddlers. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg.*, 130(5), 570-574. <https://doi.org/10.1001/archotol.130.5.570>

Ruff, M. R., Niemann, H., Allen, C. C., Farrow, E. C., & Wylie, T. (1992). The Ruff 2 and 7 Selective Attention Test : A Neuropsychological Application. *Perceptual and Motor Skills*, 75(3), 1311-1319. <https://doi.org/10.2466/pms.1992.75.3f.1311>

Sharma, A., Dorman, M. F., & Kral, A. (2005). The Influence of a Sensitive Period on Central Auditory Development in Children With Unilateral and Bilateral Cochlear Implants. *Hearing Research*, 203(1-2), 134-143. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2004.12.010>

Singh, A. K., Phillips, F., Merabet, L. B., & Sinha, P. (2018). Why Does the Cortex Reorganize after Sensory Loss? *Trends in Cognitive Sciences*, 22(7), 569-582. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2018.04.004>

Svirsky, A. M., Teoh, S.-W., & Neuburger, H. (2004). Development of Language and Speech Perception in Congenitally, Profoundly Deaf Children as a Function of Age at Cochlear Implantation. *Audiol Neurootol*, 9(4), 224-233. <https://doi.org/10.1159/000078392>

Vachon, P., Voss, P., Lassonde, M., Leroux, J. M., Mensour, B., Beaudoin, G., Bourgouin, M. P., & Lepore, F. (2013). Reorganization of the Auditory, Visual and Multimodal Areas in Early Deaf Individuals. *Neuroscience*, 245, 50-60. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2013.04.004>

Visschers, W. R., Jacobs, A. M., Frasnelli, J., Hummel, T., Burgering, M. J., & Boelrijk, E. M. A. (2006). Cross-Modality of Texture and Aroma Perception Is Independent of Orthonasal or Retronasal Stimulation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(15), 5509-5515. <https://doi.org/10.1021/jf060533c>

Voss, P. (2018). Brain (re)organization following visual loss. *WIREs Cognitive Science*, 10(1). <https://doi.org/DOI:10.1002/wcs.1468>

Voss, P., Lassonde, M., Gougoux, F., Fortin, M., Guillemot, J.-P., & Lepore, F. (2004). Early- and Late-Onset Blind Individuals Show Supra-Normal Auditory Abilities in Far-Space. *Current Biology*, 14(19), 1734-1738. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2004.09.051>

Wechsler, D. (2013). WASI -II: Wechsler abbreviated scale of intelligence—Second edition. *Journal of Psychoeducational Assessment*, 31(3), 337-341. <https://doi.org/10.1177/0734282912467756>

Wolfensberger, M. (2000). Sniffin' Sticks : A New Olfactory Test Battery. *Acta Oto-Laryngologica*, 120(2), 303-306. <https://doi.org/10.1080/000164800750001134>

Chapitre 3 – Discussion

3.1 Objectif de l'étude

Dans le contexte de ce projet de recherche, une étude a été réalisée afin de mieux comprendre la modalité olfactive chez les individus sourds. Plus précisément, l'objectif était d'évaluer la fonction olfactive chez des individus ayant une déficience auditive congénitale bilatérale sévère à profonde et de les comparer à des individus entendants. Selon l'hypothèse de plasticité intermodale lors d'une privation sensorielle, une meilleure performance aux tests olfactifs était attendue au sein de la population sourde. Nous voulions comparer la performance des participants sourds en ce qui concerne leurs capacités de seuil olfactif, de détection, d'identification et de localisation d'odeurs en comparaison à des individus entendants, et ce, en utilisant des mesures olfactives fiables et valides. Pour ce faire, le test du Sniffin' Sticks et des tâches psychophysiques utilisant un olfactomètre ont été utilisés afin d'identifier de potentielles différences de performance olfactive entre les deux populations. Dans la prochaine section, les résultats obtenus seront plus amplement abordés, suivis par une explication des caractères adaptatifs de ces résultats ainsi que l'impact des implants cochléaires et des facteurs individuels qui peuvent influencer les résultats des scores obtenus. Finalement, nous discuterons des limites de la présente étude et des orientations futures.

3.2 Résultats

Les résultats obtenus démontrent des performances atypiques au niveau de la modalité olfactive chez les individus sourds congénitaux en comparaison aux individus entendants, et ce, au test du Sniffin' Sticks et aux tâches d'olfactomètre. Plus spécifiquement, nous avons trouvé une influence de la surdité sur les capacités olfactives, à l'instar des performances visuelles et tactiles présentées dans les études antérieures (Auer et al., 2007; Bavelier et al., 2000, 2001; Codina et al., 2011; Cranney et Ashton, 1982; Frenzel et al., 2012; Griffiths et Warren, 2002; Hauthal et al., 2013; Karns et al., 2012; Reynolds, 1993).

3.2.1 Sniffin' Sticks : seuil, discrimination et identification

Le test du Sniffin' Sticks évaluait trois composantes de l'olfaction, soit le seuil de détection (T), la discrimination (D) et l'identification (I) des odeurs. L'addition des trois composantes donnait un score composite des trois sous-tests (TDI) qui permettait d'obtenir des performances olfactives à une échelle clinique: normosmie ($TDI \geq 31$), hyposmie ($15 < TDI < 31$) et anosmie ($TDI \leq 15$) (Hummel et al., 1997; Wolfensberger, 2000). Afin de tester uniquement les participants avec une normosmie, seuls les participants ayant des capacités olfactives dans la limite de la normale (score TDI global $\geq 31/48$) ont été inclus. Dans notre étude, les individus sourds semblaient avoir un meilleur odorat dans les tâches de discrimination, d'identification et de scores globaux (TDI). Par contre, des résultats indifférenciés entre les sourds et les entendants ont été obtenus dans la tâche de détection. Nous reviendrons sur ce dernier résultat un peu plus loin dans ce chapitre. Ces résultats contredisent les deux études portant sur la modalité olfactive de personnes sourdes qui rapportaient une performance inférieure à celle des entendants (Diekmann et al., 1994; Guducu et al., 2016). En effet, dans l'étude de Diekmann et collaborateurs (1994), neuf individus présentant une déficience auditive profonde et 20 individus témoins dans une condition d'oreilles bouchées témoignent qu'une privation auditive n'augmente pas la performance olfactive au Munich Olfaction Test (MOT) dans les tâches de discrimination, de seuil de détection et d'identification d'odeurs (Diekmann et al., 1994). D'ailleurs, les auteurs soulèvent des limites de collaboration avec les personnes sourdes lors des tests de reniflement. En effet, certains concepts abstraits comme « sentir », « percevoir » et même les notions numériques de « plus ou moins » généraient des difficultés de compréhension chez les sujets sourds. Une faible collaboration de leur part aurait donc pu expliquer les résultats obtenus (Diekmann et al., 1994). Dans l'étude de Guducu et collaborateurs (2016), treize adolescents sourds congénitaux avaient des performances significativement moins bonnes dans le test du Sniffin' Sticks à la tâche de détection du seuil, la tâche de discrimination et au score combiné (TDI) que les entendants. Aucune différence n'était trouvée pour la tâche d'identification par rappel identifié. Les auteurs soulèvent cependant une tendance d'hyposmie dans leur groupe d'individus sourds. En effet, sur les treize participants sourds il n'y avait que trois participants avec une normosmie, soit avec un score TDI jugé comme normal, sept avec une hyposmie et deux avec une anosmie. Contrairement

à notre étude, les scores en deçà de la limite normale n'ont pas été exclus, ce qui expliquerait les performances supérieures du groupe contrôle (Guducu et al., 2016). Dans notre étude, nous avons inclus seulement des participants avec une normosmie et un seul participant sourd qui n'a pas été en mesure de compléter la tâche du Sniffin' Sticks a été exclu. Ainsi, la comparaison des groupes dans notre étude se fait entre deux populations avec un odorat considéré comme « normal ». Notre groupe n'est donc pas comparable à cette dernière étude sur le plan des capacités olfactives. Ensuite, l'absence d'évaluation cognitive empêchait la comparaison de l'efficacité intellectuelle des participants. Il était donc impossible d'affirmer que les groupes témoins et expérimentaux étaient équivalents et que le profil cognitif n'intervenait pas comme une variable confondante.

3.2.2 Précision et vitesse de localisation et d'identification

Pour le test automatisé, les participants ont reçu deux types de stimulation olfactive, soit l'odeur d'eucalyptol (eucalyptus) et l'odeur de benzaldéhyde (amande). Les stimulations ont été présentées à l'une des deux narines ([L] gauche ou [R] droite). Les participants ont reçu un ordre écrit: « Où? » ou « Quoi? ». Ensuite, ils devaient localiser l'odeur (D ou G) ou l'identifier (E ou A) et appuyer sur le bouton de réponse aussi rapidement que possible. Le "Où?" était une tâche de localisation et la commande « Quoi? » Était une tâche d'identification. Nous avons enregistré la précision et le temps de réponse aux deux tâches. Des performances olfactives supérieures chez les participants sourds ont été observées lors de ces deux tâches. Les participants sourds avaient de meilleurs scores au niveau de la précision dans la tâche d'identification de l'olfactomètre et ils avaient un temps de réponse significativement plus rapide que les participants entendants dans la tâche d'identification et dans la tâche de localisation de l'olfactomètre. Ces performances supérieures au niveau olfactif chez les participants sourds vont à l'encontre des résultats des précédentes études (Diekmann et al., 1994; Guducu et al., 2016). Cependant, il n'y avait pas de différence significative pour les scores de précision entre les deux groupes à la tâche de localisation de l'olfactomètre. Nous avons vu plus tôt dans l'introduction de ce mémoire que le système trigéminal sert à la localisation d'odeurs (Frasnelli et Manescu, 2017). En effet, contrairement aux odorants purs, les stimuli activant le système trigéminal peuvent être localisés par l'être humain (Frasnelli et al., 2009). Or, une localisation correcte des odeurs se fait par un

système trigéminal fonctionnel (Kobal et al. 1989) et par un odorant qui contient une qualité trigéminal (Frasnelli et al., 2009). Les odeurs utilisées au test de l'olfactomètre, soit l'odeur d'eucalyptol (eucalyptus) et l'odeur de benzaldéhyde (amande) ont toutes les deux une qualité trigéminal et activeraient toutes deux le système trigéminal. Les scores obtenus démontrent des résultats significatifs pour l'identification d'odeur au test de l'olfactomètre, mais pas de différence significative pour la localisation. Ces résultats suggèrent qu'en effet, le système olfactif est amélioré chez les individus sourds, mais pas le système trigéminal.

3.2.3 Tests cognitifs

Les mesures d'évaluation cognitive ont été réalisées auprès des participants sourds afin de pouvoir contrôler ou nuancer l'effet de certains processus cognitifs sur les performances obtenues lors des tests olfactifs. Pour cela, nous avons eu recours au test de la Figure complexe de Rey-Osterrieth, au test Ruff 2&7 et aux sous-tests de Blocs et de Matrice de la *Wechsler Abbreviated Scale of Intelligence II*. Tous les scores des participants sourds étaient compris dans la moyenne. Cependant, les scores aux sous-tests de Blocs et de Matrice de la *Wechsler Abbreviated Scale of Intelligence II* se situaient dans la moyenne élevée. Ces deux derniers tests nécessitent de bonnes capacités visuoperceptives (Wechsler, 2013). Nos résultats sont donc conformes aux études précédentes décrivant des capacités d'attention visuelle et de synchronisation visuomotrice supérieures chez les sourds congénitaux (Colmenero et al., 2004; Hong Lore et Song, 1991; Iversen et al., 2015; Neville, 1987; Parasnis, I. et Samar, V. J., 1985).

3.2.4 Port de l'implant cochléaire

Sur les onze participants sourds, cinq individus portaient un implant cochléaire (IC) au moment de l'administration des tests. Nous avons comparé ces cinq participants au reste du groupe des participants sourds et nous n'avons pas trouvé de différence significative entre les participants qui portent un IC et ceux qui n'en portent pas. Des études ont montré l'existence d'une période critique limitée aux premières années (avant 2 ans ; Waltzman et Cohen, 1998) de la vie qui doit être respectée afin que l'IC ait un effet sur la réorganisation intermodale (Green et al., 2007; Kral et al., 2005; Lee et al., 2017; Sharma et al., 2005). Cependant, seulement deux de nos cinq participants porteurs d'IC ont été implantés avant l'âge de deux ans. Cela pourrait expliquer

pourquoi nous n'observons pas de différence entre les individus porteurs d'IC et les non-porteurs. Dans le présent chapitre, une section sera consacrée à ce sujet.

3.3 Caractéristiques adaptatives des résultats

3.3.1 Plasticité adaptative

Une privation sensorielle, engendrée par la surdité par exemple, peut générer un recrutement de régions corticales normalement responsable du traitement fonctionnel du sens perdu (ex. audition) par les autres modalités sensorielles intactes (Merabet & Pascual-Leone, 2010). À titre d'exemple, il a été démontré que des régions auditives et associées au traitement linguistique sont recrutées pour le traitement tactile ainsi que le traitement visuel linguistique et non linguistique chez des personnes sourdes (Merabet & Pascual-Leone, 2010). Des recherches issues de l'humain et de l'animal soulèvent que ces adaptations seraient associées à des changements retrouvés à différents niveaux du cerveau (Rauschecker, 1995). En effet, une expansion des régions cérébrales ou des voies les plus actives se fait au détriment d'autres régions ou voies. Ainsi, dans ce système compétitif, une privation sensorielle va accélérer l'expansion d'une voie concurrente (Rauschecker, 1995). Ces changements ont été trouvés à la fois dans les régions cérébrales qui traitent les modalités sensorielles restantes et les régions qui traitent normalement le sens perdu (Rauschecker, 1995). Sur le plan fonctionnel, cette plasticité intermodale peut s'exprimer par des compétences ou des performances comportementales supérieures aux individus ne présentant pas de privation sensorielle (Merabet & Pascual-Leone, 2010).

Contrairement à la littérature de la population aveugle, moins d'évidences ont été rapportées quant à la présence de changements morphologiques importants dans les modalités cérébrales intactes de la population sourde (Merabet et Pascual-Leone, 2010). Cependant, cette absence de changement n'efface pas la probabilité que certaines différences morphologiques puissent exister dans des régions visuelles d'ordre supérieur ou dans d'autres régions sensorielles. C'est pourquoi d'autres études doivent se pencher sur cette question (Merabet et Pascual-Leone, 2010). Par ailleurs, des études récentes en imagerie fonctionnelle et en psychophysique

convergent en direction de capacités visuelles spécifiques améliorées chez l'individu sourd (Alencar et al., 2019). Les régions corticales subissant une plasticité intermodale seraient responsables de la médiation des fonctions visuelles supérieures. Alencar et collaborateurs (2019) énumèrent diverses études sur les fonctions visuelles centrales qui sont améliorées chez les sourds en comparaison aux participants entendants, dont la discrimination des objets et du visage et les fonctions visuelles périphériques (par ex., détection de mouvement, localisation visuelle, synchronisation visuomotrice et l'acuité mesurée en périphérie). Cette attention visuelle accrue et la rapidité de détection de cibles chez les individus sourds pourraient expliquer la meilleure performance obtenue dans notre échantillon au niveau du temps de réponse dans les tâches de localisation et d'identification de l'olfactomètre.

En général, les résultats suggèrent que la réorganisation intermodale du cortex auditif des individus sourds serait la source des résultats visuels supérieurs rapportés. Comme ces effets ont été trouvés dans la modalité visuelle, l'hypothèse principale du présent mémoire a été émise relativement à ce phénomène de plasticité intermodale qui, au travers d'autres modalités sensorielles, se traduirait aussi par des performances supérieures en olfaction chez les individus sourds en comparaison aux individus entendants. Malgré que la réorganisation cérébrale soit bien documentée, l'explication fonctionnelle sous-jacente demeure incertaine (Singh et al., 2018). Il est cependant admis que ces changements intermodaux sous-tendent des comportements adaptatifs et compensatoires (Merabet et Pascual-Leone, 2010). D'ailleurs, la réorganisation cérébrale se présenterait aussi comme une stratégie adaptative utilisée par le système nerveux pour atteindre l'homéostasie, soit la capacité d'un système à maintenir l'équilibre de son milieu interne (Singh et al., 2018). Ainsi, une perte de modalité sensorielle serait compensée avec un apport supplémentaire de ressources neuronales aux flux sensoriels restants (Singh et al., 2018). Cela explique les résultats obtenus aux scores olfactifs par les individus sourds dans le cadre de notre recherche. En effet, si on considère le principe de réorganisation cérébrale et le phénomène de plasticité intermodale qui se traduit par des performances supérieures lors d'une privation sensorielle, on peut considérer les résultats obtenus comme étant « normaux » voire même adaptatif ; l'odorat serait amélioré chez les individus sourds pour compenser la privation auditive. Cependant, des études en neuroimagerie seront nécessaires afin de mettre en relation les

résultats comportementaux améliorés en olfaction aux substrats neuronaux à la base de la plasticité cérébrale des sourds congénitaux. De plus, pour expliquer les résultats indifférenciés entre les sourds et les entendants qui ont été obtenus dans la tâche de détection du test Sniffin' Sticks, nous mettons l'hypothèse que la surdité affecte principalement le traitement olfactif de plus haut niveau, soit les deux autres tâches (discrimination et identification).

3.3.2 Plasticité maladaptative

Malgré les gains compensatoires attribuables à la plasticité intermodale suivant une privation sensorielle (par ex., surdité), il est possible qu'elle soit maladaptative notamment dans le processus de réhabilitation et de récupération de la fonction sensorielle perdue (Merabet & Pascual-Leone, 2010). Le cas échéant, la réorganisation cérébrale pourrait inhiber la récupération de la fonction corticale d'origine de façon plus ou moins importante et, par conséquent, ne pas être pour le mieux (Singh et al., 2018). Plusieurs travaux sur les porteurs d'implants cochléaires (IC) ont été menés pour rendre compte de ce phénomène.   titre d'exemple, le niveau d'hypométabolisme avant l'implantation cochléaire de sourds pr linguaux était associé au degré d'amélioration de la fonction auditive après l'implantation (Lee et al., 2001). Ainsi, si la plasticité intermodale avant l'implantation permettait de rétablir le métabolisme du cortex auditif, les individus sourds ne présentaient aucune amélioration de la fonction auditive, et ce, malgré le succès de la chirurgie et une r ducation optimale. Par conséquent, le niveau d'activité métabolique de glucose qui augmente en fonction de l'activité neuronale (Catalán-Ahumada et al., 1993) indique que les changements neuroplastiques intermodaux sont responsables des problèmes de perception de la parole et des sons après l'implantation (Lee et al., 2001).

Finalement, la plasticité intermodale peut s'avérer adaptative lorsqu'elle fournit des avantages fonctionnels importants, telle qu'une meilleure capacité de localisation sonore chez l'aveugle (Merabet & Pascual-Leone, 2010). D'autre part, cette réorganisation cérébrale peut aussi se présenter comme maladaptative lorsqu'elle détériore le traitement sensoriel de la modalité perdue, ce qui affecte le potentiel d'un individu à être un bon candidat pour l'implantation d'un dispositif prosthétique qui restaure la fonction sensorielle (Merabet et al., 2005). Sur le plan clinique, les stratégies de r ducation ainsi que la décision d'implanter une

prothèse doivent reposer sur l'évaluation des effets de la fonction sensorielle atteinte, mais également tenir compte de l'interférence possible de l'évolution du traitement multimodal consécutif à la privation sensorielle (Merabet et al., 2005). Les comportements compensatoires ne se présentent donc pas comme le résultat exclusif de la perte sensorielle, mais davantage comme la conséquence du maintien de la fonction par le cerveau entier (Pascual-Leone et al., 2005). Une meilleure compréhension de la plasticité intermodale permettra alors d'identifier le degré de changements pouvant interférer avec la récupération de la fonction auditive (Alencar et al., 2019).

3.4 Implant cochléaire et période critique

Bien qu'elle puisse survenir tout au long de la vie (Voss et al., 2017), la plasticité corticale est contrainte à des périodes de temps limités en début de développement (Hensch, 2005; Knudsen, 2004). Les diverses fonctions comportementales ont donc des périodes sensibles différentes (i.e., période développementale où la plasticité neuronale est plus élevée) (Ruben, 1997), incluant les fonctions langagière et auditive (Kral et al., 2001). Le cortex auditif d'une personne ayant une surdité congénitale ne peut mûrir normalement, mais cette maturation peut se manifester au travers d'une implantation cochléaire (IC) qui permet à l'individu d'être exposé à une certaine expérience auditive (Kral et al., 2001). Il est cependant essentiel que l'implantation d'un tel dispositif se produise dans la période sensible du système auditif (Kral et al., 2001).

Les IC sont des dispositifs neuroprothétiques qui permettent d'éviter l'utilisation de l'oreille interne se trouvant dans un état non fonctionnel par le biais d'une stimulation électrique directe au nerf auditif. Bien que différente de la stimulation acoustique, la stimulation électrique permet d'induire une activité imitant le processus de codage de la cochlée (Dorman & Wilson, 2004; Hartmann & Kral, 2004). Une revue de littérature par Kral et Sharma (2012) met en lumière les contraintes associées à la période sensible lors d'une implantation cochléaire. Les sourds prélingaux (c.-à-d., surdité survenant avant le développement du langage) qui reçoivent un IC tôt dans l'enfance parviennent à acquérir un langage oral (Kral et Sharma, 2012). En effet, lorsque la procédure se produit précocement dans la période sensible, la maturation corticale adéquate permet la perception de la parole et l'acquisition d'un langage oral puisque l'audition se voit

contextualisée dans un cadre comportemental au travers de son interaction avec l'environnement qui fournit une rétroaction constante (Kral et Sharma, 2012). Au contraire, bien qu'une implantation tardive permette tout de même à l'individu d'entendre, la discrimination de sons complexes dans des situations quotidiennes est difficile, voire impossible pour la majorité, et ce, malgré des années d'expérience à utiliser l'IC (Kral et Sharma, 2012). Par conséquent, la compréhension de la parole et l'apprentissage de la langue orale sont largement compromis.

Des études ont démontré qu'une récupération de l'audition après une privation sensorielle ne peut survenir au-delà d'une période critique (Kral et al., 2005; Sharma et al., 2005). Par conséquent, il existe aussi une fenêtre temporelle pour l'implantation cochléaire (Kral et Sharma, 2012). Si l'implantation se produit après la période sensible située dans les premières années de vie, il y a une diminution rapide des chances de récupération (Voss et al., 2010). La période optimale pour l'IC se situe dans les 3,5–4,0 premières années compte tenu de la plasticité maximale des voies auditives centrales aux stimulations sonores (Kral et Sharma, 2012). Plus précisément, des études ont rapportées qu'avant l'âge de deux ans, les enfants sourds arrivent à acquérir un langage parlé dans un intervalle de temps comparable à celui d'enfants entendants (Hammes et al., 2002; Waltzman et Cohen, 1998).

Une nuance est cependant de mise concernant la plasticité corticale. Bien que l'âge (ici la durée de la privation auditive) soit un élément clé dans la variance du résultat de l'implantation, Green et collaborateurs (2005) ont montré que la durée de la privation expliquerait seulement 9% de la variabilité du résultat. D'autres études pointent aussi en direction d'une modulation par divers facteurs (Lee et al., 2001; O'Donoghue et al., 2000; Sarant et al., 2001). Il est à noter que la plasticité induite par des stimuli peut être améliorée en dehors de ces périodes sensibles (Voss et al., 2017) par des entraînements comportementaux intenses régulant les entrées sensorielles (Mishra et al., 2014; Villers-Sidani et al., 2010) ou en renforçant les systèmes neuromodulateurs (Kang et Vaucher, 2009; Rokem et Silver, 2010; Voss, 2016). Divers facteurs influencent donc l'efficacité de l'IC en plus de l'âge. Ces résultats illustrent la perspective d'utiliser des stratégies complémentaires pour promouvoir une plasticité corticale et améliorer la réhabilitation auditive.

3.6 Limite de l'étude

Une limite majeure à cette étude est l'arrivée de la pandémie du COVID-19 et la fermeture des laboratoires de recherche. Nous aurions aimé avoir plus de participants afin d'agrandir notre taille d'échantillon pour des résultats plus robustes. À la base, nous avons voulu avoir un minimum de vingt personnes dans chaque groupe et nous avons des participants déjà recrutés. Avec l'arrivée de la pandémie du COVID-19, nous avons dû annuler tous les rendez-vous incluant l'administration des tests cognitifs aux sujets entendants. Un portrait cognitif global des participants entendants aurait été pertinent pour comparer avec le profil cognitif des participants sourds. Aussi, le groupe des participants avec un IC est relativement petit et hétérogène. Un plus grand groupe avec des participants implantés à un âge presque similaire, ou implantés dans la période critique (avant deux ans ; Svirsky et al., 2004) aurait été intéressant. De plus, une autre limite est l'un des outils utilisés pour tester l'olfaction. En effet, Luers et collaborateurs (2014) affirment que le test du Sniffin' Sticks ne peut pas révéler les performances supérieures de la fonction olfactive, étant donné que ce test est principalement conçu pour révéler des dysfonctions olfactives pour des évaluations cliniques (Luers et al., 2014). Cependant, la présence d'une différence significative au test du Sniffin' Sticks entre nos deux groupes ne peut pas être négligée. De plus, la même tendance entre nos deux groupes est observée lors de l'administration du test de l'olfactomètre. Finalement, comme nous l'avons mentionné plus haut, les résultats obtenus dans le cadre de cette étude soutiennent la présence d'un phénomène de plasticité cérébrale de type compensatoire entre les modalités auditives et olfactives. Toutefois, on ne peut pas confirmer l'existence d'un tel phénomène ni entièrement observer les changements qu'entraîne cette privation dans le cerveau sans avoir effectué une tâche complémentaire d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf).

3.7 Orientations futures

Les études futures devraient inclure un plus grand échantillon pour examiner l'association entre la surdité et les capacités olfactives. Aussi, il serait intéressant d'ajouter un troisième groupe de participants sourds avec des IC pour observer la présence ou non d'un effet lorsque les individus sourds portent un dispositif prothétique qui restaure leur fonction auditive. Il faudrait également

effectuer des évaluations cognitives dans tous les groupes afin d'avoir une meilleure comparaison des profils intergroupes. Finalement, pour confirmer l'existence d'un phénomène de plasticité intermodale, il faudrait effectuer une tâche d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf). Une enquête dans ce sens à l'aide de techniques de neuroimagerie devrait fournir des informations utiles sur les substrats neuronaux à la base des capacités améliorées des individus aveugles congénitaux.

3.8 Conclusion

Les principales constatations de la présente étude sont que, par rapport aux témoins, les personnes avec une perte auditive congénitale bilatérale sévère à profonde étaient meilleures pour la discrimination et l'identification d'odeurs au test du Sniffin' Sticks. Ils étaient aussi plus précis à la tâche d'identification au test de l'olfactomètre et ils avaient un temps de réponses significativement meilleures que les témoins dans les tâches de localisation et d'identification au test de l'olfactomètre. Ces conclusions constituent un pas vers une meilleure connaissance des modalités sensorielles lors d'une privation auditive. Malgré certaines limites, la méthodologie employée était rigoureuse et tenait compte des limitations des études antérieures. Nos résultats sont novateurs au sens où ils sont les premiers à présenter de meilleures performances olfactives chez les individus ayant une déficience auditive congénitale bilatérale sévère à profonde, comparativement à une population entendante. Ces résultats sont en faveur d'un phénomène de plasticité cérébrale de compensation entre la modalité auditive et olfactive. En effet, comme chez les personnes aveugles, les sourds doivent compter davantage sur leurs autres sens restants pour accomplir leurs activités quotidiennes ce qui expliquerait les performances olfactives obtenues. Cependant, pour plusieurs, les individus sourds semblent moins handicapés que les aveugles et en conséquence reçoivent moins d'attention de la part de la communauté scientifique. Bien que nos résultats démontrent des capacités olfactives améliorées chez les sourds, la littérature portant sur ce sujet reste donc limitée et nécessite davantage d'investigations pour confirmer les résultats rapportés.

Références bibliographiques

Albrecht, J., Kopietz, R., Frasnelli, J., Wiesmann, M., Hummel, T., & Lundström, J. N. (2010). The neuronal correlates of intranasal trigeminal function—An ALE meta-analysis of human functional brain imaging data. *Brain Research Reviews*, 62(2), 183-196. <https://doi.org/10.1016/j.brainresrev.2009.11.001>

Alencar, D. C. C., Blake, E. B., & Lomber, S. G. (2019). What and How the Deaf Brain Sees. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 31(8), 1089-1109. https://doi.org/doi:10.1162/jocn_a_01425

Amoore, J. E. (1977). Specific anosmia and the concept of primary odors. *Chemical Senses*, 2(3), 267-281. <https://doi.org/10.1093/chemse/2.3.267>

Araneda, R., Renier, L. A., Rombaux, P., Cuevas, I., & De Volder, A. G. (2016). Cortical Plasticity and Olfactory Function in Early Blindness. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 10. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2016.00075>

Auer, E. T., Bernstein, L. E., Sungkarat, W., & Singh, M. (2007). Vibrotactile activation of the auditory cortices in deaf versus hearing adults. *Neuroreport*, 18(7), 645-648. <https://doi.org/10.1097/WNR.0b013e3280d943b9>

Axel, R. (1995). *The Molecular Logic of Smell*. 273(4), 154-159.

Bandell, M., Story, G. M., Hwang, S. W., Viswanath, V., Eid, S. R., Petrus, M. J., Earley, T. J., & Patapoutian, A. (2004). Noxious cold ion channel TRPA1 is activated by pungent compounds and bradykinin. *Neuron*, 41(6), 849-857. [https://doi.org/10.1016/s0896-6273\(04\)00150-3](https://doi.org/10.1016/s0896-6273(04)00150-3)

Bavelier, D., Brozinsky, C., Tomann, A., Mitchell, T., Neville, H. J., & Liu, G. (2001). Impact of early deafness and early exposure to sign language on the cerebral organization for motion processing. *The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 21(22), 8931-8942. <https://doi.org/21/22/>

Bavelier, D., Tomann, A., Hutton, C., Mitchell, T., Corina, D., Liu, G., & Neville, H. J. (2000). Visual attention to the periphery is enhanced in congenitally deaf individuals. *Journal of Neuroscience*, 20(17), 1-6.

Beaulieu-Lefebvre, M., Schneider, F. C., Kupers, R., & Ptito, M. (2011). Odor perception and odor awareness in congenital blindness. *Brain Research Bulletin*, *84*(3), 206-209. <https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2010.12.014>

Behrendt, H. J., Germann, T., Gillen, C., Hatt, H., & Jostock, R. (2004). Characterization of the mouse cold-menthol receptor TRPM8 and vanilloid receptor type-1 VR1 using a fluorometric imaging plate reader (FLIPR) assay. *British journal of pharmacology*, *141*(4), 737-745. <https://doi.org/10.1038/sj.bjp.0705652>

Blachère, C. (2016). L'olfaction chez le patient laryngectomisé total: apports d'ateliers de réhabilitation olfactive. Figure 1 : Le système olfactif principal. D'après Marieb & Hoehn (2010). <https://www.semanticscholar.org/paper/L'olfaction-chez-le-patient-laryngectomis%C3%A9-total-%3A-Blach%C3%A8re/d7a01f5bdd444aea1aac9a987a59584dcfb6ac90/figure/0>

Boonen, B., Startek, J. B., & Talavera, K. (2016). Chemical Activation of Sensory TRP Channels. In D. Krautwurst (Éd.), *Taste and Smell* (Vol. 23, p. 73-113). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/7355_2015_98

Bosworth, R. G., & Dobkins, K. R. (2002). The effects of spatial attention on motion processing in deaf signers, hearing signers, and hearing nonsigners. *Brain and Cognition*, *49*(1), 152-169. <https://doi.org/10.1006/brcg.2001.1497>

Bottari, D., Caclin, A., Giard, M.-H., & Pavani, F. (2011). Changes in early cortical visual processing predict enhanced reactivity in deaf individuals. *PloS One*, *6*(9), e25607. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0025607>

Bottari, D., Nava, E., Ley, P., & Pavani, F. (2010). Enhanced reactivity to visual stimuli in deaf individuals. *Restorative Neurology and Neuroscience*, *28*(2), 167-179. <https://doi.org/10.3233/RNN-2010-0502>

Boyle, J. A., Frasnelli, J., Gerber, J., Heinke, M., & Hummel, T. (2007). Cross-modal integration of intranasal stimuli: A functional magnetic resonance imaging study. *Neuroscience*, *149*(1), 223-231. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2007.06.045>

Brand, G. (2006). Olfactory/trigeminal interactions in nasal chemoreception. *Neuroscience &*

Biobehavioral Reviews, 30(7), 908-917. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2006.01.002>

Buck, L., & Axel, R. (1991). A novel multigene family may encode odorant receptors : A molecular basis for odor recognition. *Cell*, 65(1), 175-187. [https://doi.org/10.1016/0092-8674\(91\)90418-x](https://doi.org/10.1016/0092-8674(91)90418-x)

Burton, H., Snyder, P. J., Conturo, T. E., Akbudak, E., Ollinger, J. M., & Raichle, M. E. (2002). Adaptive Changes in Early and Late Blind : A fMRI Study of Braille Reading. *Journal of neurophysiology*, 87(1), 589-607.

Bushdid, C., Magnasco, M. O., Vosshall, L. B., & Keller, A. (2014). Humans Can Discriminate More than 1 Trillion Olfactory Stimuli. *Science*, 343(6177), 1370-1372. <https://doi.org/10.1126/science.1249168>

Catalán-Ahumada, M., Deggouj, N., Volder, D. A., Melin, J., Michel, C., & Veraart, C. (1993). High metabolic activity demonstrated by positron emission tomography in human auditory cortex in case of deafness of early onset. *Brain Research*, 623(2), 287-292. [https://doi.org/10.1016/0006-8993\(93\)91439-Y](https://doi.org/10.1016/0006-8993(93)91439-Y)

Caterina, M. J., Schumacher, M. A., Tominaga, M., Rosen, T. A., Levine, J. D., & Julius, D. (1997). The capsaicin receptor : A heat-activated ion channel in the pain pathway. *Nature*, 389(6653), 816-824. <https://doi.org/10.1038/39807>

Cattani, A., & Clibbens, J. (2005). Atypical lateralization of memory for location : Effects of deafness and sign language use. *Brain and Cognition*, 58(2), 226-239. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2004.12.001>

Chen, D., & Dalton, P. (2005). The Effect of Emotion and Personality on Olfactory Perception. *Chemical Senses*, 30(4), 345-351. <https://doi.org/10.1093/chemse/bji029>

Chen, Q., Zhang, M., & Zhou, X. (2006). Effects of spatial distribution of attention during inhibition of return (IOR) on flanker interference in hearing and congenitally deaf people. *Brain Research*, 1109(1), 117-127. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2006.06.043>

Codina, C., Buckley, D., Port, M., & Pascalis, O. (2011). Deaf and hearing children : A comparison of peripheral vision development. *Developmental Science*, 14(4), 725-737.

<https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2010.01017.x>

Cohen, L. G., Weeks, R., Sadato, N., Celnik, P., Ishii, K., & Hallett, M. (2001). Period of susceptibility for cross-modal plasticity in the blind. *Annals of Neurology*, *45*(4), 451-460.

Collignon, O., Dormal, G., de Heering, A., Lepore, F., Lewis, T. L., & Maurer, D. (2015). Long-Lasting Crossmodal Cortical Reorganization Triggered by Brief Postnatal Visual Deprivation. *Current Biology*, *25*(18), 2379-2383. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2015.07.036>

Colmenero, J. M., Catena, A., Fuentes, L. J., & Ramos, M. M. (2004). Mechanisms of visuospatial orienting in deafness. *European Journal of Cognitive Psychology*, *16*(6), 791-805. <https://doi.org/10.1080/09541440340000312>

Corcoran, C., Whitaker, A., Coleman, E., Fried, J., Feldman, J., Goudsmith, N., & Malaspina, D. (2005). Olfactory deficits, cognition and negative symptoms in early onset psychosis. *Schizophrenia Research*, *80*, 283-293. <https://doi.org/10.1016/j.schres.2005.07.028>

Cornell Kärnekull, S., Arshamian, A., Nilsson, M. E., & Larsson, M. (2016). From Perception to Metacognition : Auditory and Olfactory Functions in Early Blind, Late Blind, and Sighted Individuals. *Frontiers in Psychology*, *7*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.01450>

Cowart, B. J., & Rawson, N. E. (2008). Olfaction. In *Blackwell Handbook of Sensation and Perception* (p. 567-600). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470753477.ch18>

Cranney, J., & Ashton, R. (1982). Tactile spatial ability : Lateralized performance of deaf and hearing age groups. *Journal of Experimental Child Psychology*, *34*(1), 123-134. [https://doi.org/10.1016/0022-0965\(82\)90035-2](https://doi.org/10.1016/0022-0965(82)90035-2)

Cuevas, I., Plaza, P., Rombaux, P., De Volder, A. G., & Renier, L. (2009). Odour discrimination and identification are improved in early blindness. *Neuropsychologia*, *47*(14), 3079-3083. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.07.004>

Demattè, M. L., Sanabria, D., Sugarman, R., & Spence, C. (2006). Cross-Modal Interactions Between Olfaction and Touch. *Chemical Senses*, *31*(4), 291-300. <https://doi.org/10.1093/chemse/bjj031>

Diekmann, H., Walger, M., & von Wedel, H. (1994). [Sense of smell in deaf and blind patients]. *HNO*, 42(5), 264-269.

Dorman, M. F., & Wilson, B. S. (2004). The Design and Function of Cochlear Implants : Fusing medicine, neural science and engineering, these devices transform human speech into an electrical code that deafened ears can understand. *American Scientist*, 436-445.

Doty, R. L. (2001). *OLFACTION*. 52:423-452, 423-441. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.52.1.423>

Doty, R. L., Brugger, W. E., Jurs, P. C., Orndorff, M. A., Snyder, P. J., & Lowry, L. D. (1978). Intranasal trigeminal stimulation from odorous volatiles : Psychometric responses from anosmic and normal humans. *Physiology & Behavior*, 20(2), 175-185. [https://doi.org/10.1016/0031-9384\(78\)90070-7](https://doi.org/10.1016/0031-9384(78)90070-7)

Doty, R. L., & Kamath, V. (2014). The influences of age on olfaction : A review. *Frontiers in Psychology*, 5. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00020>

Fedoroff, I. C., Stoner, S. A., Andersen, A. E., Doty, R. L., & Rolls, B. J. (1995). Olfactory dysfunction in anorexia and bulimia nervosa. *International Journal of Eating Disorders*, 18(1), 71-77. [https://doi.org/10.1002/1098-108X\(199507\)18:1<71::AID-EAT2260180108>3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/1098-108X(199507)18:1<71::AID-EAT2260180108>3.0.CO;2-5)

Finger, T. E., Getchell, T. V., & Kinnamon, J. C. (1990). Afferent and efferent functions of peptidergic innervation of the nasal cavity. *Chemical Senses*, 2, 1-20.

Frasnelli, J., Charbonneau, G., Collignon, O., & Lepore, F. (2009). Odor Localization and Sniffing. *Chemical Senses*, 34(2), 139-144. <https://doi.org/10.1093/chemse/bjn068>

Frasnelli, J., Hummel, T., Berg, J., Huang, G., & Doty, R. L. (2011). Intranasal Localizability of Odorants : Influence of Stimulus Volume. *Chemical Senses*, 36(4), 405-410. <https://doi.org/10.1093/chemse/bjr001>

Frasnelli, J., & Manescu, S. (2017). The Intranasal Trigeminal System. In A. Buettner (Éd.), *Springer Handbook of Odor* (p. 113-114). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26932-0_46

Frenzel, H., Bohlender, J., Pinsker, K., Wohlleben, B., Tank, J., Lechner, S. G., Schiska, D., Jaijo, T.,

Rüschendorf, F., Saar, K., Jordan, J., Millán, J. M., Gross, M., & Lewin, G. R. (2012). A Genetic Basis for Mechanosensory Traits in Humans. *PLOS Biology*, *10*(5), e1001318. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001318>

Gagnon, L., Ismaili, A. R. A., Ptito, M., & Kupers, R. (2015). Superior Orthonasal but Not Retronasal Olfactory Skills in Congenital Blindness. *PLOS ONE*, *10*(3), e0122567. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0122567>

Gerkin, R. C., & Castro, J. B. (2015). The number of olfactory stimuli that humans can discriminate is still unknown. *eLife*, *4*, e08127. <https://doi.org/10.7554/eLife.08127>

Goldreich, D., & Kanics, I. M. (2003). Tactile Acuity is Enhanced in Blindness. *Journal of Neuroscience*, *23*(8), 3439-3445. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.23-08-03439.2003>

Gottfried, J. A. (2010). Central mechanisms of odour object perception. *Nature Reviews Neuroscience*, *11*(9), 628-641. <https://doi.org/10.1038/nrn2883>

Gottfried, J. A., & Dolan, R. J. (2003). The nose smells what the eye sees : Crossmodal visual facilitation of human olfactory perception. *Neuron*, *39*(2), 375-386. [https://doi.org/10.1016/S0896-6273\(03\)00392-1](https://doi.org/10.1016/S0896-6273(03)00392-1)

Gottfried, J. A., Winston, J. S., & Dolan, R. J. (2006). Dissociable Codes of Odor Quality and Odorant Structure in Human Piriform Cortex. *Neuron*, *49*(3), 467-479. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2006.01.007>

Gougoux, F., Lepore, F., Lassonde, M., Voss, P., Zatorre, R. J., & Belin, P. (2004). Pitch discrimination in the early blind. *Nature*, *430*(6997), 309-309. <https://doi.org/10.1038/430309a>

Gougoux, F., Zatorre, R. J., Lassonde, M., Voss, P., & Lepore, F. (2005). A Functional Neuroimaging Study of Sound Localization : Visual Cortex Activity Predicts Performance in Early-Blind Individuals. *PLOS Biology*, *3*(2), e27. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0030027>

Grant, A. C., Thiagarajah, M. C., & Sathian, K. (2000). Tactile perception in blind Braille readers : A psychophysical study of acuity and hyperacuity using gratings and dot patterns. *Perception & Psychophysics*, *62*(2), 301-312.

Green, Kevin .M.J, Julyan, P. J., Hastings, D. L., & Ramsen, R. T. (2005). Auditory Cortical Activation and Speech Perception in Cochlear Implant Users : Effects of Implant Experience and Duration of Deafness. *Hearing Research*, 205(1-2), 184-192. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2005.03.016>

Green, K.M.J, Bhatt, Y. M., Mawman, D. J., O'Driscoll, M. P., Saeed, S. R., Ramsden, R. T., & Green, M. W. (2007). Predictors of Audiological Outcome Following Cochlear Implantation in Adults. *Cochlear Implants int.*, 8(1), 1-11. <https://doi.org/10.1179/cim.2007.8.1.1>

Griffiths, T. D., & Warren, J. D. (2002). The planum temporale as a computational hub. *Current Biology*, 25(7), 348-353.

Guducu, C., Oniz, A., Ikiz, A. O., & Ozgoren, M. (2016). Chemosensory Function in Congenitally Blind or Deaf Teenagers. *Chemosensory Perception*, 9(1), 8-13. <https://doi.org/10.1007/s12078-015-9199-2>

Gudziol, H., Schubert, M., & Hummel, T. (2001). Decreased Trigeminal Sensitivity in Anosmia. *ORL*. <https://doi.org/10.1159/000055713>

Hammes, D. M., Novak, M. A., Rotz, L. A., Willis, M., Edmondson, D. M., & Thomas, J. F. (2002). Early Identification and Cochlear Implantation : Critical Factors for Spoken Language Development. *Ann Otol Rhinol Laryngol Suppl.*, 189, 74-78. <https://doi.org/10.1177/000348940211110s516>

Hartmann, R., & Kral, A. (2004). Central Responses to Electrical Stimulation. *Springer Handbook of Auditory Research*, 20, 213-285. https://doi.org/10.1007/978-0-387-22585-2_6

Hauthal, N., Sandmann, P., Debener, S., & Thome, J. D. (2013). Visual movement perception in deaf and hearing individuals. *Advances in Cognitive Psychology*, 9(2), 53-61. <https://doi.org/doi:10.2478/v10053-008-0131-z>

Hedner, M., Larsson, M., Arnold, N., Zucco, G. M., & Hummel, T. (2010). Cognitive factors in odor detection, odor discrimination, and odor identification tasks. *Journal of clinical and experimental neuropsychology*, 32(10), 1062-1067. <https://doi.org/10.1080/13803391003683070>

Hensch, T. (2005). Critical period plasticity in local cortical circuits. *Nature Reviews Neuroscience*,

6(11), 877-888. <https://doi.org/10.1038/nrn1787>

Holley, A. (2006). Système olfactif et neurobiologie. In *Odeurs* (p. 107-122). Association Terrain. « <http://journals.openedition.org/terrain/4220> » Extrait de: Isabelle Balsamo. « Odeurs. » Livres.

Hong Lore, W., & Song, S. (1991). Central and peripheral visual processing in hearing and nonhearing individuals. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 29(5), 437-440. <https://doi.org/10.3758/bf03333964>

Huart, C., Eloy, P., & Rombaux, P. (2013). Olfaction. In T. M. Önerci (Éd.), *Nasal Physiology and Pathophysiology of Nasal Disorders* (p. 113-137). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-37250-6_10

Hudry, J., Saoud, M., d'Amato, T., Daléry, J., & Royet, J.-P. (2002). Ratings of Different Olfactory Judgements in Schizophrenia. *Chemical Senses*, 27(5), 407-416. <https://doi.org/10.1093/chemse/27.5.407>

Huff, T., & Daly, D.T. (2018). *Neuroanatomy, Cranial Nerve 5 (Trigeminal)*. (Treasure Island).

Hummel, T., & Frasnelli, J. (2019). Chapter 8—The intranasal trigeminal system. In *Handbook of Clinical Neurology* (Vol. 164, p. 119-134). Elsevier.

Hummel, T., Kobal, G., Gudziol, H., & Mackay-Sim, A. (2007). Normative data for the “Sniffin’ Sticks” including tests of odor identification, odor discrimination, and olfactory thresholds : An upgrade based on a group of more than 3,000 subjects. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 264(3), 237-243. <https://doi.org/10.1007/s00405-006-0173-0>

Hummel, T., & Livermore, A. (2002). Intranasal chemosensory function of the trigeminal nerve and aspects of its relation to olfaction. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 75(5), 305-313. <https://doi.org/10.1007/s00420-002-0315-7>

Hummel, T., Mohammadian, P., & Kobal, G. (1998). Handedness is a determining factor in lateralized olfactory discrimination. *Chemical Senses*, 23(5), 541-544. <https://doi.org/10.1093/chemse/23.5.541>

Hummel, T., Sekinger, B., Wolf, S. R., Pauli, E., & Kobal, G. (1997). 'Sniffin' Sticks' : Olfactory Performance Assessed by the Combined Testing of Odor Identification, Odor Discrimination and Olfactory Threshold. *Chemical Senses*, 22(1), 39-52. <https://doi.org/10.1093/chemse/22.1.39>

Iversen, R. J., Patel, D. A., Nicodemus, B., & Emmorey, K. (2015). Synchronization to Auditory and Visual Rhythms in Hearing and Deaf Individuals. *Cognition*, 134, 232-244. <https://doi.org/DOI:10.1016/j.cognition.2014.10.018>

Jacob, T. J. C., & Wang, L. (2006). A new method for measuring reaction times for odour detection at iso-intensity : Comparison between an unpleasant and pleasant odour. *Physiology & Behavior*, 87(3), 500-505. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2005.11.018>

Jacquot, L., Hidalgo, J., & Brand, G. (2010). Just noticeable difference in olfaction is related to trigeminal component of odorants. *Rhinology*, 48, 281-284. <https://doi.org/10.4193/Rhin09.200>

Jordt, S.-E., Bautista, D. M., Chuang, H., McKemy, D. D., Zygmunt, P. M., Högestätt, E. D., Meng, I. D., & Julius, D. (2004). Mustard oils and cannabinoids excite sensory nerve fibres through the TRP channel ANKTM1. *Nature*, 427(6971), 260-265. <https://doi.org/10.1038/nature02282>

Kang, J. I., & Vaucher, E. (2009). Cholinergic Pairing With Visual Activation Results in Long-Term Enhancement of Visual Evoked Potentials. *PLOS ONE*, 4(6). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0005995>.

Karns, C. M., Dow, M. W., & Neville, H. J. (2012). Altered cross-modal processing in the primary auditory cortex of congenitally deaf adults : A visual-somatosensory fMRI study with a double-flash illusion. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 32(28), 9626-9638. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.6488-11.2012>

Katotomichelakis, M., Balatsouras, D., Tripsianis, G., Davris, S., Maroudias, N., Danielides, V., & Simopoulos, C. (2008). The effect of smoking on the olfactory function. *Rhinology*, 45, 273-280.

Kavoi, B. M., & Jameela, H. (2011). Comparative Morphometry of the Olfactory Bulb, Tract and Stria in the Human, Dog and Goat. *International Journal of Morphology*, 29(3), 939-946. <https://doi.org/10.4067/S0717-95022011000300047>

Keck, T., Leiacker, R., Riechelmann, H., & Rettinger, G. (2000). Temperature profile in the nasal cavity. *The Laryngoscope*, *110*(4), 651-654. <https://doi.org/10.1097/00005537-200004000-00021>

Kettenmann, B., Hummel, C., Stefan, H., & Kobal, G. (1997). Multiple olfactory activity in the human neocortex identified by magnetic source imaging. *Chemical Senses*, *22*(5), 493-502. <https://doi.org/10.1093/chemse/22.5.493>

Knudsen, E. (2004). Sensitive periods in the development of the brain and behavior. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *16*(8), 1412-1425. <https://doi.org/10.1162/0898929042304796>

Kobal, G., Hummel, T., Sekinger, B., Barz, S., Roscher, S., & Wolf, S. (1996). « Sniffin' sticks » : Screening of olfactory performance. *Rhinology*, *34*(4), 222-226.

Kobal, G., Van Toller, S., & Hummel, T. (1989). Is there directional smelling? *Experientia*, *45*(2), 130-132. <https://doi.org/10.1007/BF01954845>

Koutsoklenis, A., & Papadopoulos, K. (2011). Auditory Cues Used for Wayfinding in Urban Environments by Individuals with Visual Impairments. *Journal of visual impairment & blindness*, *105*, 692-702. <https://doi.org/10.1177/0145482X11110501016>

Kral, A., Hartmann, R., Tillein, J., Heid, S., & Klinke, R. (2001). Delayed Maturation and Sensitive Periods in the Auditory Cortex. *Audiol Neurootol*, *6*, 346-362. <https://doi.org/10.1159/000046845>

Kral, A., Kronenberger, G. W., Pisoni, B. D., & O'Donoghue, M. G. (2016). Neurocognitive factors in sensory restoration of early deafness : A connectome model. *The Lancet. Neurology*, *15*(6), 610-621. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(16\)00034-X](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(16)00034-X)

Kral, A., & Sharma, A. (2012). Developmental neuroplasticity after cochlear implantation. *Trends in Neurosciences*, *35*(2), 111-122. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2011.09.004>

Kral, A., Tillein, J., Heid, S., Hartmann, R., & Klinke, E. (2005). Postnatal Cortical Development in Congenital Auditory Deprivation. *Cerebral Cortex*, *15*(5), 552-562. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhh156>

Krumbholdz, K., Schönwiesner, M., Rübsamen, R., Zilles, K., Fink, G. R., & Cramon, Y. V. D. (2005). Hierarchical processing of sound location and motion in the human brainstem and planum

temporale. *European Journal of Neuroscience*, 21(1), 230-238. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2004.03836.x>

Kupers, R., & Ptito, M. (2014). Compensatory plasticity and cross-modal reorganization following early visual deprivation. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 41, 36-52.

La Buissonnière Ariza, V., Lepore, F., Kojok, K. M., & Frasnelli, J. (2013). Increased Odor Detection Speed in Highly Anxious Healthy Adults. *Chemical Senses*, 38, 577-584. <https://doi.org/doi:10.1093/chemse/bjt028>

Larsson, M., Nilsson, L.G., Olofsson, J.K., & Nordin, S. (2004). Demographic and cognitive predictors of cued odor identification : Evidence from a population-based study. *Chemical Senses*, 29(6), 547-554.

Lascano, A. M., Hummel, T., Lacroix, J.-S., Landis, B. N., & Michel, C. M. (2010). Spatio-temporal dynamics of olfactory processing in the human brain : An event-related source imaging study. *Neuroscience*, 167(3), 700-708. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2010.02.013>

Laska, M., Genzel, D., & Wieser, A. (2005). The number of functional olfactory receptor genes and the relative size of olfactory brain structures are poor predictors of olfactory discrimination performance with enantiomers. *Chemical Senses*, 30(2), 171-175. <https://doi.org/10.1093/chemse/bji013>

Lecanuet, J. P., & Schaal, B. (2002). Sensory performances in the human foetus : A brief summary of research. *Intellectica*, 34(1), 29-56.

Lee, D. S., Lee, J. S., Oh, S.-H., Kim, S., Kim, J.-W., Chung, J.-K., Lee, C. M., & Kim, C.-S. (2001). Cross-modal plasticity and cochlear implants. *Nature*, 409, 149-150. <https://doi.org/10.1038/35051653>

Lee, H.-J., Giraud, A.-L., Eunjoo, K., Oh, S.-H., Kang, H., Kim, C.-S., & Lee, D. S. (2017). Cortical Activity at Rest Predicts Cochlear Implantation Outcome. *Cerebral Cortex*, 17(4), 909-917. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhl001>

Leinders-Zufall, T., & Ma, M. (2009). Olfactory Epithelium. In L. R. Squire (Éd.), *Encyclopedia of Neuroscience* (p. 113-118). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-008045046-9.01684-3>

Lessard, N., Paré, M., Lepore, F., & Lassonde, M. (1998). Early-blind human subjects localize sound sources better than sighted subjects. *Nature*, *395*(6699), 278-280. <https://doi.org/10.1038/26228>

Lomber, S. G., Meredith, A. M., & Kral, A. (2010). Cross-modal plasticity in specific auditory cortices underlies visual compensations in the deaf. *Nature Neuroscience*, 1421-1427.

Luers, J. C., Mikolajczak, S., Hahn, M., Wittekindt, C., Beutner, D., Hüttenbrink, K.-B., & Damm, M. (2014). Do the blinds smell better? *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, *271*(7), 1933-1937. <https://doi.org/10.1007/s00405-013-2816-2>

Malnic, B., Hirono, J., Sato, T., & Buck, L. B. (1999). Combinatorial Receptor Codes for Odors. *Cell*, *96*(5), 713-723. [https://doi.org/10.1016/S0092-8674\(00\)80581-4](https://doi.org/10.1016/S0092-8674(00)80581-4)

McGann, J. P. (2017). Poor human olfaction is a 19th-century myth. *Science*, *356*(6338). <https://doi.org/10.1126/science.aam7263>

McKemy, D. D., Neuhausser, W. M., & Julius, D. (2002). Identification of a cold receptor reveals a general role for TRP channels in thermosensation. *Nature*, *416*(6876), 52-58. <https://doi.org/10.1038/nature719>

Meierhenrich, U. J., Golebiowski, J., Fernandez, X., & Cabrol-Bass, D. (2005). De la molécule à l'odeur Les bases moléculaires des premières étapes de l'olfaction. *L'actualité chimique*, 29-40.

Merabet, L. B., & Pascual-Leone, A. (2010). Neural reorganization following sensory loss : The opportunity of change. *Nature Reviews Neuroscience*, *11*, 44-52. <https://doi.org/10.1038/nrn2758>

Merabet, L. B., Rizzo, J. F., Amedi, A., Somers, D. C., & Pascual-Leone, A. (2005). What blindness can tell us about seeing again : Merging neuroplasticity and neuroprostheses. *Nature Reviews Neuroscience*, *6*, 71-77. <https://doi.org/10.1038/nrn1586>

Mirza, N., Kroger, H., & Doty, R. L. (1997). Influence of Age on the 'Nasal Cycle'. *The Laryngoscope*, *107*(1), 62-66. <https://doi.org/10.1097/00005537-199701000-00014>

Mishra, J., Villers-Sidani, É., Merzenich, M. M., & Gazzaley, A. (2014). Adaptive Training Diminishes Distractibility in Aging Across Species. *Neuron*, *84*(5), 1091-1103.

<https://doi.org/10.1016/j.neuron.2014.10.034>

Mullol, J., Alobid, I., Mariño-Sánchez, F., Quintó, L., Haro, J. de, Bernal-Sprekelsen, M., Valero, A., Picado, C., & Marin, C. (2012). Furthering the understanding of olfaction, prevalence of loss of smell and risk factors : A population-based survey (OLFACAT study). *BMJ Open*, 2(6), e001256. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2012-001256>

Murphy, C., & Cain, W. S. (1986). Odor identification : The blind are better. *Physiology & Behavior*, 37(1), 177-180. [https://doi.org/10.1016/0031-9384\(86\)90402-6](https://doi.org/10.1016/0031-9384(86)90402-6)

Neville, H. J. (1987). Attention to central and peripheral visual space in a movement detection task : An event-related potential and behavioural study. II. Congenitally deaf adults. *Brain Research*, 405, 268-283.

Neville, H. J., & Lawson, D. (1987). Attention to central and peripheral visual space in a movement detection task : An event-related potential and behavioral study. II. Congenitally deaf adults. *Brain Research*, 405(2), 268-283. [https://doi.org/10.1016/0006-8993\(87\)90295-2](https://doi.org/10.1016/0006-8993(87)90295-2)

Norman, J. F., & Bartholomew, A. N. (2011). Blindness enhances tactile acuity and haptic 3-D shape discrimination. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 73(7), 2323-2331. <https://doi.org/10.3758/s13414-011-0160-4>

Oberman, L., & Pascual-Leone, A. (2013). Chapter 4 - Changes in Plasticity Across the Lifespan : Cause of Disease and Target for Intervention. In M. M. Merzenich, M. Nahum, & T. M. Van Vleet (Éds.), *Progress in Brain Research* (Vol. 207, p. 91-120). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63327-9.00016-3>

O'Donoghue, M. G., Nikolopoulos, T. P., & Archbold, S. M. (2000). Determinants of Speech Perception in Children After Cochlear Implantation. *Lancet*, 356(9228), 466-468. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(00\)02555-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(00)02555-1)

Parasnis, I., & Samar, V. J. (1985). Parafoveal attention in congenitally deaf and hearing young adults. *Brain and Cognition*, 4(3), 313-327. [https://doi.org/10.1016/0278-2626\(85\)90024-7](https://doi.org/10.1016/0278-2626(85)90024-7)

Pascual-Leone, A., Amedi, A., Fregni, F., & Merabet, L. B. (2005). The plastic human brain cortex.

Annual Review of Neuroscience, 28, 377-401.
<https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.27.070203.144216>

Pause, B. M., Miranda, A., Göder, R., Aldenhoff, J. B., & Ferstl, R. (2001). Reduced olfactory performance in patients with major depression. *Journal of Psychiatric Research*, 35(5), 271-277.
[https://doi.org/10.1016/S0022-3956\(01\)00029-2](https://doi.org/10.1016/S0022-3956(01)00029-2)

Pavani, F., Macaluso, E., Warren, J. D., Driver, J., & Griffiths, T. D. (2002). A Common Cortical Substrate Activated by Horizontal and Vertical Sound Movement in the Human Brain. *Current Biology*, 12(18), 1584-1590. [https://doi.org/10.1016/S0960-9822\(02\)01143-0](https://doi.org/10.1016/S0960-9822(02)01143-0)

Postolache, T. T., Wehr, T. A., & Doty, R. L. (2002). Patients With Seasonal Affective Disorder Have Lower Odor Detection Thresholds Than Control Subjects. *Arch Gen Psychiatry*, 59(12), 1119-1122.
<https://doi.org/10.1001/archpsyc.59.12.1119>

Purves, D., Augustine, G.J., Fitzpatrick, D., Hall, W.C., LaMantia, A.S., Mooney, R.D., Platt, M.L., & White, L. (2017). *Neuroscience* (6^e éd.). Oxford University Press.

Rauschecker, J. P. (1995). Compensatory plasticity and sensory substitution in the cerebral cortex. *Trends in Neurosciences*, 18(1), 36-43.

Reynolds, H. (1993). Effects of Foveal Stimulation on Peripheral Visual Processing and Laterality in Deaf and Hearing Subjects. *The American Journal of Psychology*, 523-540.

Röder, B., Rösler, F., Hennighausen, E., & Näcker, F. (1996). Event-related potentials during auditory and somatosensory discrimination in sighted and blind human subjects. *Cognitive Brain Research*, 4(2), 77-93. [https://doi.org/10.1016/0926-6410\(96\)00024-9](https://doi.org/10.1016/0926-6410(96)00024-9)

Rokem, A., & Silver, M. A. (2010). Cholinergic enhancement augments magnitude and specificity of visual perceptual learning in healthy humans. *Current Biology*, 20(19), 1723-1728.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2010.08.027>

Rolls, E. T. (2004). Convergence of sensory systems in the orbitofrontal cortex in primates and brain design for emotion. *The Anatomical Record Part A: Discoveries in Molecular, Cellular, and Evolutionary Biology*, 281A(1), 1212-1225. <https://doi.org/10.1002/ar.a.20126>

Rosenbluth, R., Grossman, E. S., & Kaitz, M. (2000). Performance of early-blind and sighted children on olfactory tasks | Request PDF. *Perception*, 29(1), 101-110. <https://doi.org/10.1068/p3001>

Rovee, C. K., Harris, S., & Yopp, R. (1973). Olfactory thresholds and level of anxiety. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 2, 76-78. <https://doi.org/10.3758/BF03327719>

Ruben, R. J. (1997). A Time Frame of Critical/Sensitive Periods of Language Development. *Acta Oto-Laryngologica*, 117(2), 202-205. <https://doi.org/10.3109/00016489709117769>

Sarafoleanu, C., Mella, C., Georgescu, M., & Perederco, C. (2009). The importance of the olfactory sense in the human behavior and evolution. *Journal of Medicine and Life*, 2(2), 196-198.

Sarant, J. Z., Blamey, P. J., Dowell, R. C., Clark, G. M., & Gibson, W. P. (2001). Variation in Speech Perception Scores Among Children With Cochlear Implants. *Ear Hear*, 22(1), 18-28. <https://doi.org/doi:10.1097/00003446-200102000-00003>.

Schaal B. et al. (1980). Les stimulations olfactives dans les relations entre l'enfant et la mère. *Reproduction Nutrition Développement*, 843-858.

Schiffman, S. N. (2001). Le cerveau en constante reconstruction : Le concept de plasticité cérébrale. In *Cahiers de psychologie clinique* (Vol. 1, p. 11-23). <https://www.cairn.info/revue-cahiers-de-psychologie-clinique-2001-1-page-11.htm>

Schwenn, O., Hundorf, I., Moll, B., Pitz, S., & Mann, W. J. (2002). [Do blind persons have a better sense of smell than normal sighted people?]. *Klinische Monatsblätter Fur Augenheilkunde*, 219(9), 649-654. <https://doi.org/10.1055/s-2002-35167>

Sell, C.S. (2014). The Mechanism of Olfaction. In *Chemistry and the Sense of Smell*. Wiley-Blackwell, 32-187. <https://doi.org/10.1002/9781118522981.ch2>

Seo, H.-S., & Hummel, T. (2017). Cross-Modal Integration in Olfactory Perception. In A. Buettner (Éd.), *Springer Handbook of Odor* (p. 115-116). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26932-0_47

Sharma, A., Dorman, M. F., & Kral, A. (2005). The Influence of a Sensitive Period on Central

Auditory Development in Children With Unilateral and Bilateral Cochlear Implants. *Hearing Research*, 203(1-2), 134-143. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2004.12.010>

Shiell, M. M., Champoux, F., & Zatorre, R. J. (2014). Enhancement of Visual Motion Detection Thresholds in Early Deaf People. *PloS One*, 9(2), e90498. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0090498>

Silver, W. L. (1990). Physiological factors in nasal trigeminal chemoreception. *Chemical senses*, 2, 21-37.

Singh, A. K., Phillips, F., Merabet, L. B., & Sinha, P. (2018). Why Does the Cortex Reorganize after Sensory Loss? *Trends in Cognitive Sciences*, 22(7), 569-582. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2018.04.004>

Sobel, N., Khan, R. M., Saltman, A., Sullivan, E. V., & Gabrieli, J. D. E. (1999). The world smells different to each nostril. *Nature*, 402(6757), 35-35. <https://doi.org/10.1038/46944>

Sorokowska, A. (2016). Olfactory Performance in a Large Sample of Early-Blind and Late-Blind Individuals. *Chemical Senses*, 41(8), 703-709. <https://doi.org/10.1093/chemse/bjw081>

Sorokowska, A., Sorokowski, P., Karwowski, M., Larsson, M., & Hummel, T. (2018). Olfactory perception and blindness : A systematic review and meta-analysis. *Psychological Research*, 83(8), 1595-1611. <https://doi.org/10.1007/s00426-018-1035-2>

Stedman, T. J., & Clair, A. L. (1998). Neuropsychological, Neurological and Symptom Correlates of Impaired Olfactory Identification in Schizophrenia. *Schizophrenia Research*, 32(1), 23-30. [https://doi.org/10.1016/S0920-9964\(98\)00021-8](https://doi.org/10.1016/S0920-9964(98)00021-8)

Stephan, H., Baron, G., & Frahm, H. D. (1988). Comparative size of brains and brain structures. *Comparative primate biology*, 4, 1-38.

Stevens, S.S. (1961). The psychophysics of sensory function. *Sensory communication*.

Stevenson, R. J. (2010). An Initial Evaluation of the Functions of Human Olfaction. *Chemical Senses*, 35(1), 3-20. <https://doi.org/10.1093/chemse/bjp083>

Svirsky, A. M., Teoh, S.-W., & Neuburger, H. (2004). Development of Language and Speech

Perception in Congenitally, Profoundly Deaf Children as a Function of Age at Cochlear Implantation. *Audiol Neurootol*, 9(4), 224-233. <https://doi.org/10.1159/000078392>

Takahashi, T., Itoh, H., Nishikawa, Y., Higuchi, Y., Nakamura, M., Sasabayashi, D., Nishiyama, S., Mizukami, Y., Masaoka, Y., & Suzuki, M. (2015). Possible relation between olfaction and anxiety in healthy subjects. *Psychiatry and Clinical Neurosciences*, 69, 431-438. <https://doi.org/doi:10.1111/pcn.12277>

Thuerauf, N., Kaegler, M., Dietz, R., Barocka, A., & Kopal, G. (1999). Dose-dependent stereoselective activation of the trigeminal sensory system by nicotine in man. *Psychopharmacology*, 142(3), 236-243. <https://doi.org/10.1007/s002130050885>

Van Boven, R., Hamilton, R. H., Kauffman, T., Keenan, J., & Pascual-Leone, A. (2000). Tactile spatial resolution in blind Braille readers. *Neurology*, 54(12), 2230-2236.

Villers-Sidani, É., Alzghoul, L., Zhou, X., Simpson, K. L., Lin, R. C., & Merzenich, M. M. (2010). Recovery of functional and structural age-related changes in the rat primary auditory cortex with operant training. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(31), 13900-13905. <https://doi.org/10.1073/pnas.1007885107>

Voss, P. (2016). Auditory Spatial Perception without Vision. *Frontiers in Psychology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.01960>

Voss, P., Collignon, O., Lassonde, M., & Lepore, F. (2010). Adaptation to sensory loss. *WIREs Cognitive Science*, 1(3), 308-328. <https://doi.org/10.1002/wcs.13>

Voss, P., Lassonde, M., Gougoux, F., Fortin, M., Guillemot, J.-P., & Lepore, F. (2004). Early- and Late-Onset Blind Individuals Show Supra-Normal Auditory Abilities in Far-Space. *Current Biology*, 14(19), 1734-1738. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2004.09.051>

Voss, P., Thomas, M. E., Cisneros-Franco, M. J., & Villers-Sidani, É. (2017). Dynamic brains and the changing rules of neuroplasticity : Implications for learning and recovery. *Frontiers in Psychology*, 8(1675). <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01657>

Waldmann, R., Champigny, G., Bassilana, F., Heurteaux, C., & Lazdunski, M. (1997). A proton-

gated cation channel involved in acid-sensing. *Nature*, 386(6621), 173-177.
<https://doi.org/10.1038/386173a0>

Waltzman, S. B., & Cohen, N. L. (1998). Cochlear Implantation in Children Younger Than 2 Years Old. *Am J Otol*, 19(2), 158-162.

Wechsler, D. (2013). WASI -II: Wechsler abbreviated scale of intelligence—Second edition. *Journal of Psychoeducational Assessment*, 31(3), 337-341. <https://doi.org/10.1177/0734282912467756>

Winston, J. S., Gottfried, J. A., Kilner, J. M., & Dolan, R. J. (2005). Integrated Neural Representations of Odor Intensity and Affective Valence in Human Amygdala. *The Journal of Neuroscience*, 25(39), 8903-8907. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1569-05.2005>

Wolfensberger, M. (2000). Sniffin' Sticks : A New Olfactory Test Battery. *Acta Oto-Laryngologica*, 120(2), 303-306. <https://doi.org/10.1080/000164800750001134>

Yang, B. H., Piao, Z. G., Kim, Y.-B., Lee, C.-H., Lee, J. K., Park, K.-S., Kim, J., & Oh, S. B. (2003). Activation of Vanilloid Receptor 1 (VR1) by Eugenol. *Journal of dental research*, 82, 781-785.
<https://doi.org/10.1177/154405910308201004>

Annexe 1: Affiche de recrutement

Participation à une étude sur l'olfaction chez les Sourds



Nous sommes à la recherche d'adultes ayant une surdité congénitale pour participer à une étude comportementale en olfaction. Nous nous intéressons aux capacités olfactives d'individus chez qui la surdité est présente dès la naissance ou est apparue à un jeune âge. Durant la séance, les participants sont invités à réaliser des tâches neuropsychologiques et des tâches basées sur l'odorat. Les participants recevront une indemnité compensatoire pour leur participation d'une durée de 3h et pour les frais de déplacement encourus.

APPROUVÉ PAR LE CÉR
DES ÉTABLISSEMENTS DU CRIR

LE : 22 OCTOBRE 2019

Critères d'inclusion pour participer :

1. Être un adulte âgé entre 18 et 55 ans
2. Présenter une surdité bilatérale sévère à profonde, et ce, dès la naissance ou à un jeune âge
3. Ne pas avoir de maladie en ORL associée à des dysfonctions olfactives
4. Ne pas avoir de trouble neurologique
5. Avoir une vision normale ou corrigée à la normale

Pour plus d'information contacter:
Rim Nazar, B.Sc. Psychologie
Étudiante à la Maîtrise en sciences biomédicales
Université de Montréal
Courriel : _____
Téléphone : _____



Annexe 2: Tableau des scores au test du Sniffin' Sticks

Sample characteristics				Sniffin' Sticks test			
Audition	Age in years	Gender	Education in years	T	D	I	TDI
D	45	F	16	11.25	12	13	36.25
H	46	F	11	8.5	12	13	33.5
D	47	M	9	9.5	12	13	34.5
H	47	M	16	12	11	14	37
D	51	F	7	12.5	14	14	40.5
H	52	F	13	8	12	15	35
D	36	F	16	11.5	13	15	39.5
H	36	F	16	10.25	11	12	33.25
D	32	F	14	13.5	14	14	41.5
H	31	F	16	10.25	15	13	38.25
D	20	M	14	14	15	16	45
H	20	M	14	15	12	13	40
D	35	M	16	9.5	15	14	38.5
H	34	M	14	11	9	11	31
D	28	M	16	15,5	15	14	44.5
H	28	M	16	12.75	15	13	40.75
D	28	F	16	12.75	14	15	41.75
H	27	F	21	12.5	11	10	33.5
D	28	F	14	11.5	14	16	41.5
H	26	F	18	12	10	13	35
D	42	F	11	11.25	14	13	38.25
H	45	F	12	11	15	15	41

D = deaf individuals; H = hearing individuals; F = female; M = male/ T= Threshold detection; D=Discrimination; I=Identification; TDI= Overall score (T+D+I)