

Université BORDEAUX SEGALEN

Année 2013

Thèse n°2117

THESE

pour le

**DOCTORAT DE L'UNIVERSITE BORDEAUX
SEGALEN**

Ecole Doctorale Sociétés, Politique et Santé Publique

Spécialité : Sciences Cognitives et Ergonomie

Option : Sciences Cognitives

Présentée et soutenue publiquement

Le 18 décembre 2013

Par Mayalen ERVITI

Née le 2 février 1985 à Boulogne Billancourt (92)

Titre de la thèse

Autisme, Perception et Mémoire Auditives

Membres du Jury

Mme Catherine SEMAL.....	Directrice de thèse
Professeur à l'Institut Polytechnique de Bordeaux	
Mme Sylvane FAURE.....	Rapporteur
Professeur à l'Université de Nice-Sophia Antipolis,	
Mme Séverine SAMSON.....	Rapporteur
Professeur à l'Université de Lille	
M. Manuel BOUVARD.....	Examineur
Professeur à l'Université Bordeaux Segalen	

A Aitor, mon fils

Remerciements

En tout premier lieu, je souhaite remercier Sylvane Faure, Professeur de neuropsychologie cognitive à l'Université de Nice, et Séverine Samson, Professeur de psychologie cognitive et neuropsychologie à l'Université de Lille pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Un très grand merci à Catherine Semal, ma directrice de thèse, pour son soutien et sa disponibilité, ainsi que pour la confiance qu'elle m'a accordée tout au long de ce travail de thèse, et depuis le début de mes études en sciences cognitives. Vous avez toujours été de bon conseil, particulièrement sur le plan de mon orientation universitaire, dont vous avez partagé les bons et les moins bons moments. Ces trois années de travail à vos côtés ont réellement été très enrichissantes tant sur le plan scientifique que sur celui de la réflexion. Votre façon souvent non conventionnelle d'appréhender les choses m'a souvent poussée dans mes retranchements, mais cela a été extrêmement bénéfique pour moi dans la construction de ma pensée. Merci pour tout.

Un grand merci à Laurent, pour sa présence et l'aide quotidienne dispensée au cours de ces trois années communes de travail. Merci pour les longues discussions, pour les réponses à mes questions et pour avoir partagé avec moi la rigueur scientifique nécessaire à toute recherche.

J'adresse mes remerciements au professeur Manuel Bouvard pour m'avoir ouvert les portes du CRA. Merci également de m'avoir permis de participer au

groupe recherche « Autisme », lors duquel les discussions ont été extrêmement bénéfiques pour moi.

Je remercie toutes les personnes rencontrées au CRA pour l'accueil dont j'ai bénéficié et pour leur intérêt pour mes travaux. Merci à Anouck Amestoy, pour avoir souvent décodé les indications et diagnostics portés, et m'avoir permis d'inclure un groupe d'adultes. Un merci tout particulier à Sylvie Lafenêtre pour m'avoir accueillie dans son bureau et m'avoir guidée durant les longues heures où j'ai étudié les dossiers des patients, ainsi qu'à Stéphanie Segarra pour sa disponibilité et la rapidité avec laquelle elle a su récupérer les précieuses références qu'il me manquait.

Je tiens vraiment à remercier du fond du cœur tous les enfants, adolescents et adultes qui ont participé à mes expériences et passé de longues heures dans la cabine insonorisée, ainsi qu'à leurs parents, qui ont parfois posé des congés et fait plusieurs dizaines de kilomètres pour accompagner leurs enfants. Je ne peux tous vous nommer ici, mais sachez que cette thèse n'existerait pas sans vous.

Merci à Sam, pour tes astuces pour faciliter le passage de cette thèse de Word vers L^AT_EX! A Damien pour ta bonne humeur quotidienne, et toutes tes patientes réponses à ma curiosité insatiable pour tout ce qui touche à la médecine! A tous les stagiaires qui se sont succédé dans notre bureau, Thibault, Florian, Arthur et Laure, pour avoir animé la calme atmosphère du labo le temps de quelques mois!

Merci à mes amis, particulièrement à Marie, Sandie, Alice et Adrien, pour m'avoir patiemment écoutée parler de ma thèse, pendant ces trois ans où je n'ai su parler que de ça.

Merci à ma famille, et notamment à mon petit frère Jon, pour m'avoir toujours soutenue, même si ce que je fais leur paraît plus ou moins obscur.

Merci Maman, d'avoir toujours été là, tout simplement. Là pour écouter, silencieusement, mes doutes et mes incertitudes, et pour m'encourager quand je ne voyais plus de porte de sortie. Si j'en suis là, c'est aussi grâce à toi.

Mes derniers remerciements vont à Sébastien et à Aitor, mes amours, vous êtes mon équilibre. Sébastien, je ne serais pas parvenue au bout de cette thèse sans toi. Merci d’avoir supporté sans jamais te plaindre toutes les contraintes dues à ce travail, et de m’avoir malgré tout apporté un amour et un soutien sans faille. Nous prenons maintenant un nouveau départ... Aitor maitia, zure Ama partekatu duzu azken aldi hauetan. Denbora osozko Ama bat ukanen duzu orain, hitzematzen zaitut.

Résumé

Peut-on dissocier perception et mémoire auditives? Intuitivement, il paraît impossible de mémoriser quelque chose que l'on n'a pas perçu. Pourtant, il existe des phénomènes auditifs pour lesquels la mémoire influence la perception.

L'objectif de ce travail de thèse est de déterminer si la perception auditive et la mémoire auditive sont deux fonctions dissociables, sous-tendues par deux mécanismes différents. Deux études utilisant des stimuli auditifs différents (des bruits périodiques, et du rehaussement) ont été réalisées.

Une population d'enfants et d'adultes autistes de haut niveau a été incluse aux participants. En effet, ces derniers présentent des particularités dans le traitement auditif. Ces particularités peuvent être interprétées à la lumière de capacités perceptives et/ou mnésiques, sans que rien ne permette de déterminer si l'une, l'autre ou les deux fonctions cognitives que sont la perception et la mémoire, sont impliquées.

Les résultats conjugués de ces deux études indiquent que les participants porteurs d'autisme présentent un déficit développemental dans le traitement de la complexité temporelle quand leur mémoire auditive est préservée. Deux mécanismes différents semblent régir les deux grandes fonctions cognitives que sont la perception auditive et la mémoire auditive, qui seraient donc dissociées.

Can we separate auditory perception and auditory memory ? Intuitively, it seems impossible to remember something that was not perceived. However, there are auditory phenomena for which memory influences perception .

The objective of this work is to determine whether the auditory perception and auditory memory are two separable functions, underpinned by two different mechanisms. Two studies using different auditory stimuli (periodic noise , and enhancement) were performed.

A population of children and adults with high functioning autism was included. Indeed , they have features in auditory processing. These features can be interpreted in the light of perceptual and / or memory capacity without anything possible to determine whether one or the other or both cognitive functions such as perception and memory, are involved.

The combined results of these two studies indicate that the participants with autism have a developmental deficit in processing temporal complexity when their auditory memory is preserved. Two different mechanisms seem to govern the two major cognitive functions such as auditory perception and auditory memory , which would therefore be separated.

Sommaire

Remerciements	3
Résumé	6
Sommaire	8
Introduction	11
1 Autisme, Perception et Mémoire Auditives	17
1.1 Perception des sons purs et Autisme	20
1.1.1 Perception de la hauteur	20
1.1.2 Perception de l'intensité	25
1.2 Mémoire sensorielle auditive et Autisme	28
2 Les bruits périodiques	34
2.1 Définition	37
2.2 Nature des éléments perceptibles	40
2.3 Bruits périodiques et mesure de la mémoire auditive	44
3 Expérience 1 : Etude des relations entre perception et mémoire auditives chez des enfants et adultes autistes de haut niveau et neurotypiques	46
3.1 Méthode	50
3.1.1 Participants	51

3.1.2	Test 1 : Etude des particularités mnésiques	52
3.1.3	Test 2 : Etude des particularités perceptives	53
3.2	Résultats et discussion	57
3.2.1	Peut-on dissocier perception et mémoire auditives ? . .	57
3.2.2	Différences entre les participants porteurs d'autisme et les participants neurotypiques	59
4	Le phénomène du rehaussement	80
4.1	Comment expliquer cet effet ?	86
4.1.1	Rehaussement d'intensité	86
4.1.2	Rehaussement de fréquence	88
4.2	Le rehaussement d'intensité et le rehaussement de fréquence sont-ils sensibles de façon égale à l'interférence (1) ?	91
4.2.1	Objectif et méthode	91
4.2.2	Résultats et discussion	94
4.3	Le rehaussement d'intensité et le rehaussement de fréquence sont-ils sensibles de façon égale à l'interférence (2) ?	97
4.3.1	Objectifs et Méthode	97
4.3.2	Résultats et discussion	98
4.4	Le mode de présentation (ipsi ou controlatéral) affecte-t-il le rehaussement d'intensité et le rehaussement de fréquence de la même façon ?	99
4.4.1	Objectifs et méthode	99
4.4.2	Résultats et discussion	100
4.5	Discussion	103
4.6	Article publié dans Journal of American Society of America (2011)	107
5	Le rehaussement pour étudier les relations entre perception et mémoire auditives chez des enfants et adultes porteurs d'autisme et neurotypiques	117

5.1	Méthode	121
5.1.1	Participants	121
5.1.2	Protocole expérimental	122
5.2	Résultats	126
5.3	Discussion	130
Conclusion		138
Table des figures		148
Bibliographie		150

Introduction

La perception, qu'elle soit visuelle, auditive, tactile, gustative ou olfactive, est la faculté qui nous relie au monde. De tous temps, première porte d'accès aux opérations mentales, la perception a été un objet d'étude privilégié pour la compréhension de l'être vivant. Sans information sensorielle, pas de contact avec notre environnement, pas de communication : prenons l'exemple de la surdité, pour laquelle Aristote pensait que la privation du sens de l'audition empêchait l'Homme d'accéder à la parole, et donc au savoir. Plus tard, Galton (1880) puis Cattell (1890), intégreront dans leurs outils respectifs visant à mesurer l'intelligence, des mesures de la perception du toucher ou de l'audition, signe de l'importance que constituait la perception pour ce qui touche aux mécanismes de la pensée. A peu près à la même époque, Fechner et Weber (1860) seront parmi les premiers à étudier la relation entre la stimulation sensorielle (physique) et la sensation qui en découle (psychologique). Ainsi, il est admis que nos organes sensoriels fournissent une multitude d'informations sur l'environnement dans lequel nous évoluons

à notre cerveau, qui les traite, les mémorise et les compare à celles déjà en mémoire.

La mémoire peut être définie comme la capacité à stocker, conserver et rappeler les informations liées à nos expériences personnelles, ou à des connaissances apprises. Comme la perception, la mémoire est une fonction qui a toujours suscité un très grand intérêt. Mnémosyne, issue d'Ouranos (le ciel) et de Gaïa (la terre) n'est-elle pas la déesse de la mémoire dans la mythologie grecque, avec laquelle s'unit Zeus pour donner naissance aux neuf muses ? Titanide par sa naissance, choisie par le Roi des dieux, Zeus, mère des protectrices des arts, Mnémosyne est un personnage important de la mythologie, témoignant de la fascination de l'Homme pour cette capacité à se souvenir de certaines informations. Pour Platon la mémoire était une tablette de cire molle (don de Mnémosyne) sur laquelle les événements produits étaient gravés de façon plus ou moins profonde. Ainsi, se souvenir était comme lire cette tablette. Beaucoup de philosophes ont réfléchi sur le thème de la mémoire, mais son étude scientifique n'a commencé qu'à la fin du XIXème siècle, avec les travaux d'Ebbinghaus (1885) qui sera le premier à concevoir des paradigmes expérimentaux visant à l'observer. S'il semble intuitif que ces deux fonctions (perception et mémoire) sont dissociées, il est néanmoins naturel d'imaginer qu'une relation sérielle les unit. En effet, il paraît tout à fait probable que l'encodage mnésique d'une information donnée ne peut être réalisé, si cette information n'a pas été préalablement perçue. Pourtant, comme nous le verrons dans la suite de ce travail, dans le domaine

de l'audition, il existe des exemples pour lesquels c'est la mémoire qui induit la perception d'une information donnée. Ainsi, davantage encore que celle de la sérialité dans la mise en jeu de ces deux fonctions, **c'est la question de leur dissociation qui se pose, et qui sera centrale dans ce travail.**

Cette thèse s'inscrit dans le cadre des Sciences Cognitives, discipline qui a constitué le pilier de mon parcours universitaire. «Les Sciences Cognitives ont pour objet de décrire, d'expliquer et le cas échéant de simuler les principales dispositions et capacités de l'esprit humain – langage, raisonnement, perception, coordination motrice, planification» (Andler 1989). En d'autres termes, elles ont pour objet d'étude la pensée humaine, et plus particulièrement les différents domaines mis en jeu lors des étapes du traitement d'une information. Un stimulus sensoriel est alors perçu, qu'il soit visuel, auditif etc. puis traité par élaboration de représentations mentales, et cette chaîne de processus donnera lieu à une réponse de l'organisme. Pour réaliser cette chaîne de processus, les Sciences Cognitives ont à leur disposition les connaissances, les outils et les modèles de plusieurs disciplines, comme la Psychologie, les Neurosciences, l'Informatique, la Philosophie, faisant d'elles une discipline dont le caractère transdisciplinaire est indéniable. La transdisciplinarité permet d'aborder un sujet sous différents points de vue. Elle fait coexister l'expertise de plusieurs domaines sur ce sujet, en exploitant leur complémentarité.

La question centrale de mon travail de thèse étant «Peut-on dissocier perception et mémoire auditives?», plusieurs domaines de recherche seront nécessairement abordés. La psychophysique se situant au carrefour de disciplines aussi différentes que la physique (mesure du stimulus), de la physiologie et des neurosciences (que se passe-t-il au niveau cellulaire, à l'échelle de neurones ou groupe de neurones, voire même de structures cérébrales) et de la psychologie cognitive (des niveaux les plus «bas», incluant la perception, à des niveaux plus «hauts» comprenant les stratégies mises en jeu pour répondre ou réaliser la tâche), elle constitue donc un champ d'étude passionnant et fournit des outils particulièrement adaptés pour amener des éléments de réponse. L'inclusion d'une population d'enfants, adolescents et adultes porteurs d'autisme a été réalisée, car l'autisme semble caractérisé par une supériorité perceptivo-mnésique pour certains aspects du traitement auditif. L'intérêt de l'étude du pathologique pour mieux comprendre le normal est un fondement de la neuropsychologie, avec notamment les travaux de Broca sur l'aphasie, par l'étude du patient «Tan». Ce patient présentait des troubles de la production, sans trouble de la compréhension du langage. A sa mort, son cerveau a été autopsié par Broca, qui a observé une lésion importante au niveau du cortex frontal inférieur gauche, confirmant son intuition selon laquelle une aire précise est associée à une fonction (1861a, b). De même, la double dissociation est couramment utilisée en neuropsychologie. Initialement proposée par Teuber (1955), elle permet d'établir la spécificité de l'effet d'une lésion cérébrale par la comparaison croisée de deux tâches

et deux localisations lésionnelles. Ainsi, si une lésion A entraîne un déficit dans une tâche x, et pas dans une tâche y, et si une lésion B entraîne un déficit dans y et pas dans x, on peut en déduire que chaque site lésionnel est associé à la réalisation de cette tâche. L'exemple le plus représentatif de double dissociation est probablement celui de l'invalidation du modèle de mémoire d'Atkinson et Schiffrin (1968), dans lequel il était postulé que la mémoire était composée de différents modules dans lesquels l'information transitait de façon sérielle, d'un registre sensoriel vers la mémoire à court terme, stockage verbal de quelques secondes, puis vers la mémoire à long terme. En effet, l'observation de deux patients a pu mettre en évidence que la mémoire à court terme et la mémoire à long terme pouvaient se distinguer. Au milieu des années 60, Brenda Milner (1959) a observé un patient (HM) qui avait subi l'ablation de ses deux hippocampes à la suite d'une opération destinée à réduire ses crises d'épilepsie particulièrement invalidantes. A son réveil, le patient HM est atteint d'une amnésie antérograde, avec une mémoire à court terme intacte (il est incapable de se souvenir d'un évènement plus de quelques secondes, mais ses performances lors de tâches de rappel immédiat sont normales). A la fin des années 60, Shallice et Warrington (1970) ont observé un patient (KF), qui, contrairement au patient HM, présentait des performances en mémoire à court terme particulièrement faibles (avec un empan à court terme limité à deux ou trois éléments) alors que ses capacités d'apprentissage et de souvenir à long terme se sont révélées intactes. Ainsi, chacun de ces deux patients présentent un type de mémoire intacte, et l'autre

type altéré, suggérant que les deux modules de mémoire sont indépendants. La double dissociation montre bien à quel point l'étude de la pathologie (déjà nécessaire pour améliorer la prise en charge des patients) est importante pour comprendre le neurotypique.

Pour résumer, l'objectif principal de ce travail de thèse est de déterminer si la perception et la mémoire sensorielle auditive sont dissociables. Pour cela, deux études ont été menées sur deux types de stimuli. La première consistait à détecter la périodicité de segments de bruits blancs, la seconde, à déterminer si un son était présent dans une série d'accords préalablement présentés, ces accords étant conçus de façon à faire apparaître un effet de rehaussement. Une expérience supplémentaire a été menée afin de préciser les connaissances sur l'effet de rehaussement. Ces expériences ont été menées sur des enfants, adolescents et adultes porteurs d'autisme de haut niveau, et des enfants, adolescents et adultes neurotypiques. L'inclusion d'une population de participants porteurs d'autisme de haut niveau a été réalisée en raison de leurs comportements perceptifs particuliers, qui peuvent être expliqués à la fois à la lumière d'une perception ou d'une mémoire auditive atypique.

Chapitre 1

Autisme, Perception et Mémoire Auditives

Sommaire

1.1	Perception des sons purs et Autisme	20
1.1.1	Perception de la hauteur	20
1.1.2	Perception de l'intensité	25
1.2	Mémoire sensorielle auditive et Autisme	28

L'autisme est un trouble du développement qui associe une altération des interactions sociales, un déficit de la communication, et une restriction des intérêts (DSM-IV APA 1994).

Très récemment, l'American Psychiatric Association (APA) a publié la nouvelle version du DSM-V (2013) dans laquelle les anomalies perceptives ont une place dans le diagnostic de l'autisme¹ : les hyperréactivités ou hyporéactivités aux stimulations sensorielles (indifférence à la douleur, à la température, mais aussi réponses négatives à des sons spécifiques) font maintenant partie des critères diagnostiques.

Un modèle en particulier s'est attaché à décrire les performances perceptives particulières des personnes porteuses d'autisme : l'Enhanced Perceptual Functioning (EPF ou Fonctionnement Perceptuel Amélioré) de Mottron et al. (2001, 2006), dans lequel la perception est considérée comme supérieure. Ce modèle propose une série de principes qui régiraient le fonctionnement de la perception dans l'autisme. Il est basé principalement sur des études centrées sur le domaine de la vision, mais intègre également quelques études sur l'audition. Parmi ces principes, on peut trouver par exemple une perception qui serait, par défaut, davantage localement orientée pour les personnes porteuses d'autisme que pour les personnes neurotypiques,

1. «Hyper- or hyporeactivity to sensory input or unusual interests in sensory aspects of the environment (e.g., apparent indifference to pain/temperature, adverse response to specific sounds or textures, excessive smelling or touching of objects, visual fascination with lights or movement).» (DSM-V, APA 2013)

ou le fait que plus une tâche est coûteuse en ressources², moins les performances des personnes autistes seront bonnes, ou encore le fait que des traitements de haut niveau³ seraient optionnels pour les personnes porteuses d'autisme, et obligatoires pour les personnes neurotypiques.

De nombreuses études ont également montré que l'autisme était caractérisé par un fonctionnement perceptif anormal (prises en compte depuis quelques mois par le DSM-V), notamment dans la modalité auditive, à la fois sous forme de réactions comportementales anormales comme une hypersensibilité à certains sons et une absence de réaction à d'autres (Watling et al. 2001, Kern et al. 2006, Tomchek et al. 2007), mais aussi en termes de capacités sensorielles auditives supérieures à la moyenne (Heaton 2003, Mottron et al. 2006) au moins pour certains aspects du traitement auditif (voir ci-dessous pour les sons purs).

La majeure partie des études comportementales réalisées sur la perception auditive dans l'autisme l'a été en étudiant les performances d'enfants, adolescents et adultes porteurs d'autisme de haut niveau, ou du syndrome d'Asperger. L'autisme de haut niveau est caractérisé par la triade de symptômes du DSM-IV associée à un retard dans l'acquisition du langage,

2. Kahneman (1973) postule que le système cognitif humain possède un stock limité de ressources mentales, qui, investies dans une tâche, vont en déterminer la qualité et la profondeur de sa réalisation. Ainsi, plus il y a de ressources impliquées dans une tâche, et meilleur est le traitement correspondant. (Attention and Effort, 1973 Prentice Hall)

3. Selon Craik et Lockhart (1972), il y a une hiérarchie dans les traitements cognitifs, appelée profondeur du traitement : plus un traitement est profond, et plus il y a d'analyse cognitive impliquée dans sa réalisation.

mais également par un QI supérieur à 70 (Tsai, 1992). Le syndrome d'Asperger est également caractérisé par la triade de symptômes évoquée précédemment et par un QI supérieur à 70, en revanche, les personnes porteuses du syndrome d'Asperger n'ont pas présenté de retard dans l'acquisition des premiers mots. Notons que depuis quelques mois, le DSM-V a supprimé le diagnostic de syndrome d'Asperger, le remplaçant par un diagnostic plus général de trouble du spectre autistique, toutefois, la totalité des études citées ici ayant été réalisées avant cette suppression, je continuerai à parler du syndrome d'Asperger dans la suite de ce travail.

1.1 Perception des sons purs et Autisme

1.1.1 Perception de la hauteur

Selon Bonnel et al. (2003), les adultes porteurs d'autisme de haut niveau ont une sensibilité à la hauteur tonale supérieure à celle d'adultes neurotypiques. Cette supériorité perceptive a été mise en évidence grâce à deux tâches de discrimination et de catégorisation de sons. Dans la tâche de discrimination, une paire de sons est présentée au sujet, qui doit indiquer si les deux sons de la paire sont identiques ou différents. Dans la tâche de catégorisation, un son pur est présenté au participant, qui doit indiquer si ce son est grave ou aigu (par rapport à une fréquence de référence). Les résultats montrent que le pourcentage de bonnes réponses des participants porteurs

d'autisme est significativement supérieur à celui des sujets du groupe contrôle dans les deux tâches proposées.

Cette étude suggère donc que les personnes porteuses d'autisme de haut niveau ont une perception de la hauteur tonale plus «fine» que celle des sujets sains. Par ailleurs, les résultats font état d'une diminution des performances dans la tâche de catégorisation par rapport à la tâche de discrimination chez les sujets sains, ce qui n'est pas le cas pour les participants porteurs d'autisme. En effet, ces derniers présentent des performances similaires pour la tâche de discrimination et pour la tâche de catégorisation. Cet effet pourrait s'expliquer par l'utilisation d'une même stratégie pour réaliser les deux tâches, c'est-à-dire comparer le dernier son entendu au son précédent, dont la trace est conservée en mémoire. La performance supérieure des participants porteurs d'autisme dans la tâche de catégorisation pourrait alors s'expliquer par une trace en mémoire plus robuste chez les participants porteurs d'autisme que chez les participants neurotypiques, la durée entre les sons étant plus longue dans cette tâche que dans la tâche de discrimination.

Une meilleure discrimination de la fréquence (mesurée par un paradigme de temps de réponse) a également été observée chez des enfants porteurs d'autisme de haut niveau par O'Riordan et Passetti (2006). Dans cette étude, les auteurs ont présenté des séquences de sons à douze enfants porteurs d'autisme de haut niveau et douze enfants neurotypiques de la façon suivante : [A B A]. A a une fréquence fixe, et à chaque présentation de la séquence, la fréquence de B (toujours plus élevée que celle de A au début du test) diminue

par pas réguliers, jusqu'à atteindre la fréquence de A. La tâche du participant est de presser une touche lorsque A et B ont une fréquence identique (la consigne indiquait à l'enfant qu'il devait répondre le plus vite possible dès qu'il entendait les deux sons comme identiques en hauteur). Les résultats montrent que les participants porteurs d'autisme ont un temps de réponse plus long que les participants neurotypiques (c'est-à-dire qu'ils ont mis plus de temps à presser la touche) quelles que soient les paires de fréquences proposées (de 250 à 2000 Hz pour le son A, et de 750 à 6000 Hz pour le son B). Les auteurs ont interprété ce résultat comme une supériorité dans la discrimination des sons purs de la part des participants porteurs d'autisme : si ces derniers ont répondu après les participants neurotypiques, c'est que les deux sons ont été différents plus longtemps pour les enfants porteurs d'autisme que pour les enfants sans trouble du développement. Cependant, la procédure utilisée ne permet pas de déterminer si les résultats reflètent réellement une discrimination supérieure de la hauteur tonale dans l'autisme, ou s'ils sont la conséquence d'une vitesse de traitement des informations diminuée. Cette dernière entraînerait un temps de réaction plus long pour les enfants porteurs d'autisme que pour les enfants neurotypiques alors que la perception de A et B comme identiques en fréquence se serait produite au même moment pour tous les participants. En effet, des déficits en vitesse de traitement ont été observées (tâches de l'indice de vitesse de traitement de l'échelle de Weschler, WAIS-IV) chez des adolescents et jeunes adultes porteurs d'autisme de haut niveau, ou atteints d'un syndrome d'Asperger,

par rapport à des adolescents et jeunes adultes neurotypiques (Holdnack et al. 2011). Ainsi, les performances supérieures des enfants porteurs d'autisme dans la tâche de discrimination d'O'Riordan et Passetti pourraient être dues à une vitesse de traitement déficitaire entraînant un temps de réponse plus long, et donc un délai de pression sur la touche plus long que celui des enfants neurotypiques. Il paraît donc difficile de conclure sur une réelle supériorité des participants porteurs d'autisme dans cette tâche de discrimination de fréquence.

Jones et al. (2009), dans une volonté de clarifier la perception des sons purs dans l'autisme, ont proposé une tâche de discrimination de fréquence à cent vingt adolescents (soixante douze porteurs d'autisme de haut et bas niveau, quarante huit neurotypiques). Les participants entendaient deux sons et devaient indiquer à l'aide d'une interface graphique lequel des deux avait la fréquence la plus haute. L'analyse des résultats n'a permis de mettre en évidence aucune différence significative entre les deux groupes de participants, cependant, devant l'hétérogénéité des troubles que regroupe le diagnostic d'autisme, les auteurs ont cherché à savoir si les performances moyennes des sujets cliniques ne cachaient pas un sous-groupe d'enfants avec des performances supérieures dans la discrimination de fréquences. En effet, Heaton et al. en 2008, dans une tâche de discrimination d'intervalles de sons complexes, avaient mis en évidence les performances très supérieures de trois participants par rapport au reste du groupe des personnes porteurs d'autisme. En revanche, à l'échelle du groupe, aucune différence significative

n'apparaissait entre le groupe d'enfants porteurs d'autisme et le groupe d'enfants neurotypiques. Comme dans l'étude de Heaton et al., l'analyse de Jones et al. a révélé que quatorze jeunes dans le groupe clinique contre quatre dans le groupe contrôle ont obtenu une performance supérieure à un écart-type par rapport à la moyenne. Lors de l'analyse de ce sous-groupe de personnes porteuses d'autisme obtenant des performances supérieures, il s'est avéré que treize parmi les quatorze participants avaient un QI total supérieur à quatre-vingts (ce qui les classe dans la catégorie «autistes de haut niveau», Tsai, 1992), et que huit parmi ces quatorze participants ont présenté un délai dans l'acquisition des premiers mots (c'est-à-dire une acquisition des premiers mots après l'âge vingt-quatre mois, ce qui exclut les participants atteints de syndrome d'Asperger, DSM IV). Tout ceci suggère que l'incidence d'une discrimination exceptionnelle de fréquences se produit majoritairement chez les personnes porteuses d'autisme de haut niveau.

A partir de ce constat, Bonnel et al. en 2010 ont proposé une nouvelle expérience de discrimination de fréquences à quinze jeunes adultes porteurs d'autisme de haut niveau (AUT), quatorze jeunes adultes porteurs du syndrome d'Asperger (SA), et quinze jeunes adultes ne présentant pas de trouble du développement (CONT). Dans cette tâche, les participants devaient écouter deux paires de sons (l'une où les sons étaient identiques, et l'autre où les sons étaient différents), et décider laquelle de ces paires contenait des sons différents. En accord avec l'étude de Jones et al., les résultats ont révélé dans le groupe AUT un seuil de discrimination de

fréquence significativement inférieur à ceux des groupes SA et CONT. De plus, aucune différence significative n'a été révélée concernant les performances des sujets des groupes SA et CONT, confirmant l'idée selon laquelle seules les personnes porteuses d'autisme de haut niveau bénéficieraient d'une discrimination de fréquence plus performante.

Notons que De Pape et al. (2012) n'ont pas retrouvé ce bénéfice dans une courte tâche de catégorisation de fréquence préliminaire à leur étude. En effet, les auteurs ont présenté 40 paires de sons purs à vingt-sept adolescents porteurs d'autisme (quinze adolescents porteurs de syndrome d'Asperger et douze adolescents porteurs d'autisme de haut niveau) et vingt-sept adolescents neurotypiques. Dans chaque paire, le premier son était toujours de même fréquence, quand la fréquence du deuxième augmentait ou diminuait aléatoirement selon les essais. Les participants devaient indiquer si le deuxième son était plus haut ou plus bas que le premier. L'analyse des résultats n'a pas mis en évidence de différence entre les performances des jeunes porteurs d'autisme et celles des jeunes neurotypiques.

1.1.2 Perception de l'intensité

Comme cela a déjà été mentionné au début de ce chapitre, les études portant sur la perception dans l'autisme rapportent fréquemment des hypo ou hypersensibilité aux stimulations sensorielles chez les personnes porteuses

d'autisme, et notamment dans la modalité auditive (Tomchek et al. 2007, Kern et al. 2006, Watling et al. 2001).

Ainsi, Khalfa et al. en 2004 ont exploré la perception subjective de l'intensité de sons purs chez des personnes porteuses d'autisme. Dans un premier temps, les auteurs ont fait passer un audiogramme à chaque participant, en notant quel était le seuil absolu de détection de chaque son pur pour une fréquence donnée. Lors de cet audiogramme, les participants devaient indiquer à quel moment le niveau de son était inconfortable (trop intense). La différence entre le seuil minimal de détection d'un son pour une fréquence donnée et le seuil d'inconfort a été notée. Dans un deuxième temps, des sons purs de fréquence 1000 Hz étaient présentés au participant. Leur intensité variait aléatoirement entre le seuil absolu et le seuil d'inconfort obtenus précédemment par le sujet et ce dernier avait pour consigne de trier ces sons selon leur intensité sur une échelle de 1 à 4, où 1 correspondait à bas, 2 à moyen, 3 à fort et 4 à trop fort. L'intensité moyenne correspondant à chaque échelon était notée.

Les résultats n'ont pas montré de différence entre les participants porteurs d'autisme et les participants neurotypiques en ce qui concerne le seuil absolu, en revanche, les seuils d'inconfort se sont avérés plus faibles chez les participants porteurs d'autisme, indiquant une sensibilité supérieure à l'intensité de la part de ces derniers. De même, les intensités moyennes correspondant à chaque niveau d'intensité étaient significativement plus basses chez les participants porteurs d'autisme, ce qui confirme la sensibilité

supérieure à l'intensité retrouvée précédemment dans le groupe clinique. Bien que ne permettant pas de distinguer sur la base de seuils absolus les participants porteurs d'autisme des participants neurotypiques, cette étude met l'accent sur la part subjective de la perception en observant des seuils d'inconfort plus importants pour les personnes porteuses d'autisme.

Jones et al. (2009), dans une étude évoquée précédemment ont, en plus d'une tâche de discrimination de fréquence, fait passer une tâche de discrimination d'intensité à cent vingt adolescents (72 adolescents porteurs d'autisme de haut et bas niveau, et 48 adolescents neurotypiques). Les participants entendaient deux sons purs et devaient déterminer lequel de ces deux sons était le plus fort. Les résultats n'ont pas mis en évidence de différence significative entre les deux groupes, laissant à penser que les personnes porteuses d'autisme ne bénéficient pas d'une supériorité dans la discrimination de l'intensité, alors que c'était le cas pour certains d'entre eux dans la discrimination de fréquence.

A ma connaissance, cette étude est la seule étude ayant étudié la discrimination d'intensité pour des sons purs chez des personnes porteuses d'autisme.

Pour résumer : la discrimination de fréquence des sons purs semble être supérieure pour un sous-groupe de personnes porteuses d'autisme, celles de haut niveau sans syndrome d'Asperger, en revanche, malgré des comportements atypiques en ce qui concerne les stimulations auditives, il ne semble pas y avoir de particularité dans la perception de l'intensité des sons purs dans l'autisme.

1.2 Mémoire sensorielle auditive et Autisme

En 2003, Bonnel et al. ont suggéré que les capacités supérieures de discrimination et de catégorisation des individus porteurs d'autisme pourraient être dues à des capacités mnésiques plus importantes. En effet, dans cette étude, les participants ont réalisé deux épreuves de discrimination et de catégorisation de sons purs faisant naturellement appel à des capacités perceptives, mais également mnésiques. Nous allons voir dans quelle mesure la mémoire auditive est impliquée dans ces deux types d'expérience.

Intéressons-nous tout d'abord à la tâche de discrimination : les expérimentateurs présentent deux sons purs au participant, qui doit indiquer si ces deux sons sont identiques en hauteur tonale. Pour répondre, l'auditeur doit comparer les deux sons, et plus précisément comparer le deuxième son

à la trace en mémoire laissée par le premier afin de conclure. Cette trace mnésique s'estompe rapidement et est sensible à l'interférence (Cowan 1984, Semal et Demany 1991, 1993, Semal et al. 1996, Clément et al. 1999).

La tâche de catégorisation, quant à elle, fait intervenir une autre forme de mémoire auditive (Durlach et Braida, 1969). Cette fois-ci, un seul son est présenté au participant à chaque essai, et ce dernier doit déterminer si le son perçu est aigu ou grave par rapport à une fréquence de référence présentée au tout début du test. Dans les protocoles expérimentaux à un intervalle (soit un seul son présenté), un mode de mémoire dépendant du contexte (context-coding mode) est mis en place. Pour réaliser la tâche, le participant compare le son entendu à un contexte général de sons (provenant de la tâche mais aussi de son expérience personnelle). Ainsi, si la fréquence du son qu'il vient d'entendre est plus haute que la moyenne des sons qu'il a entendus, alors le participant catégorisera ce son comme aigu. La mise en place d'une telle comparaison est bien plus coûteuse en ressources cognitives que le mode de mémoire dépendant de la trace mnésique, qui est dynamique mais ne perdure pas dans le temps.

La tâche de catégorisation devrait donc être plus difficile à réaliser que la tâche de discrimination, et cet effet devrait être visible sur les performances des participants, avec une baisse de la performance lorsqu'il s'agit de catégoriser le son entendu. De façon surprenante, l'analyse des résultats a fait état de performances similaires dans les deux types de tâches pour les participants porteurs d'autisme quand les participants neurotypiques

ont vu leurs performances diminuer significativement lors de la tâche de catégorisation. Bonnel et al. interprètent cette différence à la lumière de la mise en jeu de la même forme de mémoire pour la réalisation des deux tâches chez les participants porteurs d'autisme : les deux épreuves seraient traitées comme une comparaison entre le son entendu et un son en mémoire. Les individus porteurs d'autisme bénéficieraient donc d'une trace mnésique de la hauteur plus fine, d'une durée plus importante et plus résistante aux interférences. Chez les participants neurotypiques en revanche, la trace mnésique laissée par le son de référence dans la tâche de catégorisation ne serait pas assez robuste pour résister aux interférences provoquées par les sons à catégoriser. Ils devraient donc passer par une forme de mémoire dépendante du contexte, plus difficile à mobiliser, faisant ainsi chuter leurs performances. Cette explication semble vraisemblable, même s'il n'est pas évident que les participants neurotypiques utilisent une forme de mémoire dépendante du contexte pour réaliser la tâche de perception. En d'autres termes, ce qui différencierait les participants porteurs d'autisme de haut niveau et les participants neurotypiques serait une meilleure persistance de la trace mnésique pour les participants porteurs d'autisme, qui pourraient ainsi comparer de manière plus fine le son entendu et le son en mémoire, et donc mieux catégoriser les sons.

Ainsi, si le message reste inchangé, l'explication peut être différente : comme cela a été décrit précédemment, la tâche de catégorisation consistait à dire si un son pur entendu était aigu ou grave. Les participants étaient informés

du fait qu'ils entendraient soit un son grave (de fréquence 1000 Hz) soit un son aigu (de fréquence 1030 Hz pour la condition facile, 1020 Hz pour la condition moyenne et 1010 Hz pour la condition difficile). Dans la mesure où seuls deux sons possibles sont présentés, les participants neurotypiques pourraient (comme dans la tâche de discrimination) comparer le son qu'ils viennent d'entendre au précédent, qui aurait été mémorisé, comparer leurs fréquences, et décider si le dernier son entendu a une plus haute fréquence que le précédent, qu'il est catégorisé comme aigu, ou au contraire, s'il a une fréquence plus basse, qu'il soit catégorisé comme grave.

La possibilité d'une mémoire auditive supérieure a également été évoquée par Heaton dans deux études (1998, 2003), dont le protocole expérimental était similaire. Deux groupes d'enfants (porteurs d'autisme et neurotypiques) ont suivi une procédure de familiarisation à des associations arbitraires entre quatre sons (notes de piano) et quatre images d'animaux. Lors de cette étape, une image d'animal et un son était présenté à l'enfant, et l'expérimentateur lui indiquait que ce son était le son préféré de cet animal. Après cette session de familiarisation, venait l'étape d'identification de la hauteur, lors de laquelle l'enfant était face aux quatre images d'animaux pour lesquels l'association avec un son avait été apprise précédemment. Un des quatre sons lui était alors proposé, et l'enfant devait montrer quel était l'animal associé à ce son. Une semaine après cette condition, chaque enfant était à nouveau testé dans une condition de mémoire : les quatre images d'animaux lui étaient à nouveau présentées et l'enfant devait choisir à quel animal correspondait chaque son

entendu (association apprise lors des étapes précédentes). L'enfant était également testé lors d'une condition contrôle, similaire à la condition test décrite précédemment, à l'exception de la nature des sons, qui au lieu d'être des notes, devenaient des syllabes. Les syllabes (et plus généralement les stimuli langagiers) constituent un type de son bien particulier. Liberman et al. (1967) ont observé que dans le discours rapide, il pouvait y avoir jusqu'à 30 phonèmes⁴ par secondes. Pour eux, la résolution du système auditif ne permet pas de traiter les sons vocaux (qui ressembleraient à un bourdonnement inanalysable) sans un mécanisme de décodage spécifique. Des études plus récentes ont montré que les auditeurs apprenaient à reconnaître un pattern de son correspondant à une syllabe, voire même à un mot. Le protocole était rigoureusement similaire, avec une phase de familiarisation, pour l'apprentissage des associations entre animaux et syllabes, une phase d'identification et une phase de mémoire.

L'analyse des résultats a montré que les enfants porteurs d'autisme obtenaient des performances supérieures à celles des enfants neurotypiques dans l'identification et le rappel de hauteurs, alors que les performances des deux groupes d'enfants étaient similaires pour l'identification et le rappel de syllabes. De plus, les enfants porteurs d'autisme réalisaient les deux conditions de façon similaire, quand les enfants neurotypiques réussissaient mieux la condition contrôle (celle impliquant les syllabes), indiquant que la

4. Élément minimal, non segmentable, de la représentation phonologique d'un énoncé (Larousse)

particularité mnésique des enfants porteurs d'autisme était spécifique des stimuli non langagiers.

Les résultats concernant l'identification des hauteurs ont été répliqués par Heaton en 2003, soit une supériorité des enfants autistes à reconnaître l'animal associé à un son, suggérant que les individus porteurs d'autisme présentent des particularités mnésiques dans le domaine auditif.

Pour résumer : les particularités dans le traitement auditif des personnes porteuses d'autisme (au moins pour les patients diagnostiqués comme porteurs d'autisme de haut niveau) semblent pouvoir être interprétées à la lumière de capacités perceptives et/ou mnésiques, sans que rien ne nous permette de déterminer si l'une, l'autre ou les deux fonctions cognitives que sont la perception et la mémoire, sont impliquées.

Chapitre 2

Les bruits périodiques

Sommaire

2.1	Définition	37
2.2	Nature des éléments perceptibles	40
2.3	Bruits périodiques et mesure de la mémoire auditive	44

Le constat d'un traitement auditif atypique dans l'autisme nous mène à une question qui dépasse le cadre de cette pathologie, à savoir, peut-on dissocier perception et mémoire auditive ? Des capacités surdéveloppées dans le traitement perceptif impliquent-elles automatiquement une mémoire auditive très performante ou inversement ?

Intuitivement, on pourrait penser que la mémoire est la conséquence de la perception et ne peut pas en être la cause. Cependant, il existe des cas dans lesquels le contraire se produit. Prenons par exemple la perception du bruit blanc. Lors de l'écoute d'un tel bruit, nous percevons un son statique, lisse, sans caractéristique particulière.¹ En revanche, lorsqu'un segment de ce même bruit est prélevé et répété, la perception de ce stimulus va changer. En effet, des caractéristiques de ce bruit vont devenir perceptibles. On peut alors dire que les événements perceptuels en question sont une création de la mémoire, dans la mesure où ils n'existaient pas en l'absence de répétitions (Demany et Semal, 2008).² Le terme de perception désigne généralement les processus de discrimination ou d'identification, soit une relation entre un stimulus présent et la trace en mémoire d'un ou plusieurs stimuli précédents. Ainsi, la perception de la hauteur d'un son comme grave ou aiguë signifie plus précisément que la hauteur de ce son est plus grave ou aiguë que la moyenne de la hauteur des sons précédemment perçus et mémorisés.

1. merviti.ds-creation.fr/bruitblanc.html pour écouter un exemple de bruit blanc

2. merviti.ds-creation.fr/bruitperiodique.html pour écouter un exemple de bruit périodique



L'objectif global de notre première étude était d'amener des éléments permettant de clarifier les relations entre perception et mémoire dans le domaine de l'audition, c'est-à-dire, peut-on mettre en évidence une différence dans l'activité de deux processus qui auraient deux fonctions différentes, à savoir l'un qui serait responsable des traitements perceptifs, et l'autre des traitements mnésiques ? La comparaison de performances obtenues par des participants neurotypiques avec celles obtenues par des participants porteurs d'autisme, dont les performances sont connues pour être supérieures dans le traitement auditif (Haesen et al. 2011, Stanutz et al. 2012, Motttron et al. 2006) apportera un facteur supplémentaire pour une meilleure compréhension du rapport entre mémoire et perception auditives.

Nous avons vu précédemment que la perception auditive était classiquement mesurée par des tâches de discrimination ou d'identification. La mémoire auditive, quant à elle, se mesure classiquement par le biais d'une tâche de comparaison de stimuli auditifs, séparés par un délai variable (voir par exemple Wickelgren 1969 ; Deutsch 1975 ; Clément et al. 1999). La comparaison des performances dans des conditions où le délai est court, et dans des conditions où il est long indique une estimation de la capacité de la mémoire auditive. Si dans la troisième expérience de cette thèse, un protocole de la sorte est utilisé (comparaison d'une condition où deux stimuli sont présentés sans délai pour les séparer, et d'une condition où les deux stimuli sont séparés de 500 ms), pour la première expérience, notre choix s'est porté sur un autre outil de mesure de la mémoire auditive : la détection

de répétition de bruit blanc. En effet, Guttman et Julesz (1963) ont proposé une estimation de la capacité en mémoire auditive en étudiant des stimuli composés de la répétition d'un même segment de bruit blanc un certain nombre de fois. La détection de la périodicité de bruits blancs a également été utilisée par Kaernbach dans un certain nombre d'études, dans le but d'étudier la mémoire auditive (1992 ; 2004).

2.1 Définition

Les bruits périodiques (Figure 2.1) ont été précisément étudiés pour la première fois par Guttman et Julesz en 1963, à la suite de l'observation de stimuli composés d'un même segment répété de bruit blanc gaussien. La longueur de ce segment variait de 50 ms à plus d'1 s.

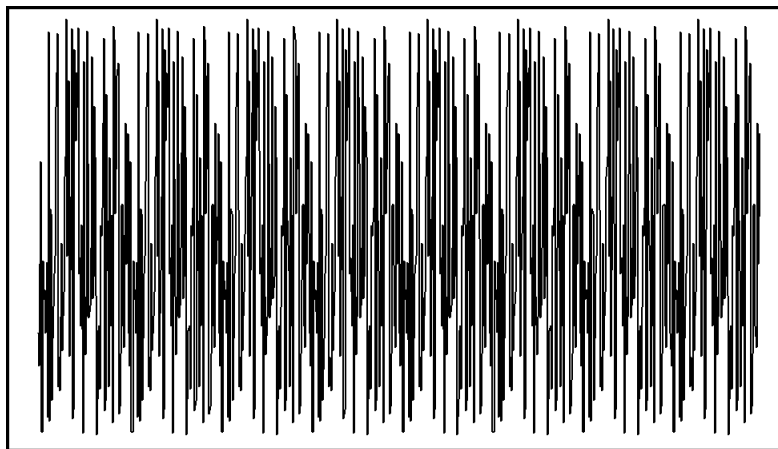


FIGURE 2.1 – Représentation graphique d'un bruit blanc périodique (8 cycles)

Cette variation de la période a permis aux auteurs de mettre en évidence quatre zones de perception de la périodicité :

- Au dessus de dix neuf cycles par seconde (soit des périodes d'un peu moins de 50 ms), la périodicité est perçue comme une hauteur tonale.
- Entre quatre et dix neuf cycles par seconde (soit des périodes allant de 250 ms à 50 ms), la périodicité est perçue comme le bruit d'un bateau à moteur («motorboating»)
- Entre un et quatre cycles par seconde (soit des périodes allant de 1 s à 250 ms) la périodicité est perçue comme un souffle («whooshing»)
- En dessous d'un cycle par seconde, l'auditeur perçoit la répétition seulement s'il se concentre avec effort sur le stimulus.

Pour Guttman et Julesz, sur des périodes supérieures à 50 ms (soit dans le cas de bruits périodiques où l'on ne perçoit pas de hauteur), la détection de la périodicité dépend de la récurrence de particularités perceptibles dans l'onde sonore. En d'autres termes, si l'on présente à un auditeur un bruit périodique constitué d'un même segment (S) répété n fois, à S_1 , le bruit paraîtra lisse, puis à partir de S_2 , des éléments saillants seront perçus. Lors des répétitions suivantes (S_3 jusqu'à S_n), ces mêmes éléments seront à nouveau perçus, et c'est la perception récurrente de ces éléments saillants qui permettra la détection de la périodicité.

Cette idée a été partiellement confirmée par Warren et al. (2001), qui préciseront que pour des cycles de 250 ms ou moins, les répétitions sont

perçues comme des percepts globaux, où les auditeurs sont incapables de percevoir des événements temporels isolés dans du bruit. Pour des cycles de 250 ms à 1 s, deux options sont possibles : soit la répétition est perçue de façon globale, comme pour des cycles plus courts, soit des petits éléments («clanks» et «thump») vont émerger lors de l'écoute d'un même segment répété. Ces petits événements sont limités à une portion restreinte du cycle. Pour des cycles d'une durée supérieure à 1 s, la perception de la répétition du cycle global est impossible. Les auteurs ont également montré que même chez des participants non entraînés, la détection de la périodicité était possible pour des segments répétés de 10 s (voire plus).

J'ai moi-même pu expérimenter la détection de la périodicité en identifiant des stimuli composés d'un segment de bruit blanc répété 4 fois, parmi des stimuli uniquement composés d'un seul segment de bruit blanc. La longueur du segment variait de 100 ms à plusieurs secondes. Il m'a semblé que pour des durées de cycles jusqu'à environ 250 ms, la détection de la périodicité se faisait à partir d'une impression globale de répétition, et qu'au-delà de 250 ms, des éléments au sein de chaque cycle se détachaient, et leur récurrence permettait de percevoir la répétition. En revanche, après des dizaines d'essais, je n'ai jamais pu détecter la périodicité pour des durées de cycles au dessus de 2 ou 3 s, contrairement aux résultats de leur étude dans laquelle même des participants non entraînés parvenaient à détecter une périodicité pour des cycles de 10 s.

Agus et al. (2010) dans une étude initialement destinée à étudier l'apprentissage de segments de bruits (décrite plus bas), concluent également que pour un stimulus de deux cycles de 500 ms présenté plusieurs fois au cours d'un bloc d'essais, il est peu probable que les auditeurs aient mémorisé la globalité de l'onde, bien qu'ils soient capables de reconnaître ce stimulus en particulier parmi d'autres bruits périodiques. Selon les auteurs de cette étude, la détection de la périodicité pour cette longueur de cycle (500 ms) se produit plus vraisemblablement en utilisant les événements perceptibles dans chaque cycle.

2.2 Nature des éléments perceptibles

Dans une étude parue en 1992, Kaernbach a tenté de déterminer quelles étaient les bases temporelles et spectrales de ces éléments saillants apparaissant lorsqu'un segment de bruit blanc est répété. Il conclut de ses analyses que ces éléments peuvent recouvrir une grande variété de structures spectro-temporelles compliquées. Leur perception est idiosyncratique, c'est-à-dire que certains seront perçus par tous les participants, alors que ce ne sera pas le cas pour d'autres. Ainsi, selon Kaernbach, dans le bruit blanc non répété, ces événements périodiques n'ont aucune structure. Leur perception est possible, mais le système perceptif ne leur attribue aucune information pertinente, et bloque les processus de traitement plus élaborés : lors de l'écoute d'un segment de bruit blanc, nous percevons donc quelque chose

d'homogène. Quand ces évènements réapparaissent en revanche, dans le cas d'un bruit blanc périodique, ils deviennent porteurs d'information, et peuvent alors être perçus et traités.

Agus et al. (2010), dans une série d'expériences étudiant l'apprentissage de bruits périodiques ont proposé à leurs participants de détecter la périodicité d'un stimulus qui pouvait être l'une de ces trois possibilités : soit 1 s de bruit blanc gaussien (N), soit un son composé d'un segment de bruit blanc gaussien de 0.5 s répété une fois. Dans le cas d'un bruit périodique, deux alternatives étaient possibles : soit ce son était différent à chaque essai (RN) soit il était généré une seule fois au début du bloc d'essais, et représenté plusieurs fois lors du test (RefRN). Pour résumer, un bloc de 200 essais comportait 100 (N), 50 (RN) et 50 (RefRN). Les participants devaient indiquer si oui ou non le son entendu était périodique. Notons qu'aucun feedback n'était donné, et que les auditeurs n'étaient pas prévenus qu'un des stimuli serait identique plusieurs fois dans un même bloc.

L'analyse des résultats a montré que la détection de la périodicité était meilleure pour les (RefRN) que pour les (RN), avec une progression tout au long de la tâche pour les (RefRN). En d'autres termes, au bout de très peu d'essais, les participants détectaient parfaitement les répétitions dans le RefRN d'un bloc donné, suggérant qu'il avait été appris. En revanche, aucune progression n'a été montrée pour le (RN), suggérant qu'il n'y a pas d'apprentissage des (RN). Dans la mesure où ces deux bruits périodiques ont été construits de façon strictement identique, ces résultats ne peuvent être

attribués qu'à la récurrence du (RefRN), et pas à des différences acoustiques. Il faut noter cependant que la performance pour les (RefRN) était très variable selon les participants et les blocs d'essais. En revanche, quand il y avait de l'apprentissage, il suffisait de deux répétitions du (RefRN), soit 4 répétitions du segment pour que la détection de la périodicité soit quasiment parfaite.

Dans un deuxième temps, les auteurs ont choisi parmi les (RefRN) de l'expérience précédente les cinq qui avaient généré les meilleures performances («good noise»), et les 5 ayant généré les plus mauvaises performances («bad noise»). Les stimuli (N) et (RN) étaient générés comme dans l'expérience précédente. Ici encore, les participants devaient indiquer si oui ou non le son entendu était périodique. Pour chaque bloc d'essai, le (RefRN) était aléatoirement un «good noise» ou un «bad noise». Les (RefRN) ont été soumis à une simulation de traitement par la périphérie auditive, et leurs caractéristiques particulières identifiées. Aucune corrélation n'a été trouvée entre les performances comportementales et les caractéristiques acoustiques testées (pics dans l'enveloppe d'amplitude, pics dans l'enveloppe spectro temporelle). L'hypothèse était que si certains stimuli étaient réellement plus faciles à apprendre que d'autres, cela devrait être vrai pour tous les participants.

L'analyse des résultats a montré que les auditeurs étaient plus sensibles aux «good noise» qu'aux «bad noise», mais que cette différence de sensibilité était plutôt petite. L'avantage pour les «good noise» n'a pas été corrélé avec les

caractéristiques saillantes (que ce soit dans l'enveloppe temporelle ou spectro temporelle). De plus, l'analyse individuelle n'a pas permis de révéler un réel consensus entre les auditeurs pour les «good noise» ou «bad noise».

Cette étude a mis en évidence la possibilité qu'a l'être vivant de mémoriser des bruits, grâce à un apprentissage implicite, ce qui semblait peu probable (Kaernbach, 1992). Vraisemblablement, cet apprentissage ne peut se faire en utilisant des stratégies de rétention comme la répétition mentale. Cette mémoire du bruit est robuste et de longue durée. Les différences entre les bruits étaient très saillantes après apprentissage, alors que ces mêmes caractéristiques étaient initialement ignorées pour la plupart par les auditeurs. Selon Agus et al. (2010), certains bruits semblent un peu plus faciles à mémoriser que d'autres, mais les analyses acoustiques ne permettent pas de les différencier sur la base de caractéristiques physiques. En accord avec Kaernbach (1992), ces caractéristiques seraient idiosyncratiques, c'est-à-dire que tous les individus ne vont pas percevoir les mêmes caractéristiques.

Pour résumer, au-delà d'une certaine fréquence de répétition, la détection de la périodicité dépend de la perception individuelle d'indices dans le bruit. La nature de ces indices demeure obscure, et il est probable que ces indices dépendent du bruit généré ainsi que de l'auditeur.

2.3 Bruits périodiques et mesure de la mémoire auditive

L'avantage que procure l'utilisation des bruits périodiques pour étudier la mémoire auditive réside dans la possibilité d'étudier une forme de mémoire très sensorielle, en écartant les aspects sémantiques constituant la mémoire verbale.

En quoi la détection de la périodicité permet-elle d'obtenir une mesure de la mémoire sensorielle auditive ?

La littérature à ce sujet rapporte fréquemment que la détection de la périodicité se fait à partir de petits éléments saillants dans chaque segment de bruit. Ces derniers se répétant, on comprend aisément que ces éléments sont stockés en mémoire lors de l'écoute du premier cycle, puis comparés à ceux qui seront perçus dans les cycles suivants. Ainsi, plus la durée du cycle est longue, plus il faudra stocker d'éléments, et plus la durée de stockage sera longue avant la comparaison.

En plus de cette explication intuitive, Kaernbach (1992) propose deux arguments supplémentaires pour étayer l'idée selon laquelle la détection de la périodicité constitue un bon indice de la capacité de la mémoire auditive :

- Des sujets entraînés peuvent détecter la périodicité sur une longueur de 10 s. C'est le cas de Christian Kaernbach lui-même, pour qui les événements perçus le sont dans un délai d'à peu près 1 s : un cycle de 10 s sonne homogène pour 9 s et structuré la seconde restante. Le

mécanisme de détection semble se concentrer sur un segment particulier d'une longueur d'1 s, qui s'insère dans la mémoire sensorielle, et essaie de détecter sa récurrence.

- En général, n cycles d'un segment de bruit évoquera $n-1$ répétitions des événements perçus. Le premier cycle sonne homogène. Si, en revanche, le sujet est entraîné à détecter des bruits périodiques, les événements pourront commencer à apparaître dès le premier cycle. Dans ce cas, il n'y a pas besoin de remplir le buffer sensoriel et d'attendre la récurrence de son contenu.

Pour résumer : la détection de la périodicité est un bon indicateur d'une forme de mémoire sensorielle (non verbale), dans la mesure où elle s'effectue par la détection de récurrences d'éléments saillants dans chaque segment de bruit blanc répété. Ainsi, à partir de la deuxième présentation du segment (ou même de la première pour les auditeurs entraînés), ces éléments sont détectés, et stockés en mémoire. A la présentation suivante, ces mêmes éléments sont à nouveau détectés, comparés à ceux en mémoire. L'auditeur pourra alors décider si le stimulus perçu est périodique ou s'il ne l'est pas.

Chapitre 3

Expérience 1 : Etude des relations entre perception et mémoire auditives chez des enfants et adultes autistes de haut niveau et neurotypiques

Sommaire

3.1	Méthode	50
3.1.1	Participants	51
3.1.2	Test 1 : Etude des particularités mnésiques	52

3.1.3	Test 2 : Etude des particularités perceptives	53
3.2	Résultats et discussion	57
3.2.1	Peut-on dissocier perception et mémoire auditives ?	57
3.2.2	Différences entre les participants porteurs d'autisme et les participants neurotypiques	59

Comme cela a été mentionné ci-dessus, l'objectif de la première expérience était d'amener des éléments permettant de **clarifier les relations entre perception et mémoire auditives**, et de répondre à la question suivante, à savoir : peut-on dissocier perception et mémoire auditives ?

Deux tâches de détection de la périodicité ont été conçues. La première est destinée à obtenir une mesure de mémoire auditive, et la seconde davantage vouée à recueillir une mesure de perception, les deux tâches étant suffisamment similaires en termes de protocole (détection de la périodicité de stimuli composés de bruits blancs) pour que ces deux mesures soient comparables.

L'inclusion d'une population de personnes porteuses d'autisme est justifiée dans la mesure où l'autisme est caractérisé par un traitement auditif supérieur sur certains aspects, mais également parce que cette supériorité perceptive pourrait s'expliquer par une mémoire auditive surdéveloppée. Il est impossible de conclure sur une supériorité dans l'un ou l'autre des domaines, ou les deux, aucune étude n'ayant été réalisée pour comparer perception et mémoire auditive dans l'autisme. Notre expérience devait donc permettre d'une part de clarifier les particularités perceptivo-mnésiques de personnes porteuses d'autisme, et d'autre part, de distinguer s'ils étaient différents les deux processus que sont la perception et la mémoire auditive.

De plus, l'autisme étant un trouble envahissant du développement, nous avons également voulu comparer des groupes d'enfants (en cours de

développement) à des groupes d'adultes (ayant terminé leur développement), afin d'observer l'évolution de la perception et de la mémoire auditives.

Wright et Zecker (2004) ont observé que le développement de certains traitements auditifs s'arrêtait à l'adolescence chez des personnes porteuses de troubles des apprentissages basés sur le langage (LP pour «learning problems»).

Dans cette étude, les auteurs ont proposé différentes tâches de masquage auditif à des enfants de différents âges et à un groupe d'adultes, et ont comparé les performances des différents groupes d'âge pour étudier le développement du traitement auditif. L'une d'entre elles, notamment, consiste en la présentation d'un son pur (1000 Hz) de 200 ms à détecter dans un bruit masqueur de 300 ms. Le niveau du signal nécessaire pour une détection correcte de 94% est recueilli. Lors de l'analyse des résultats dans cette tâche entre les groupes d'âge et les deux types de population, il s'est avéré d'une part que le développement de cette capacité est long (les enfants neurotypiques développent cette capacité bien après 10 ans), alors que pour les autres tâches de masquage, le développement est plus court (maturité à environ 8 ans) et que d'autre part, les adultes porteurs de LP présentent un déficit par rapport aux adultes neurotypiques, alors que pour les autres tâches de masquage, les adultes porteurs de LP finissent par atteindre le niveau des adultes neurotypiques. Il semble donc que le développement des capacités auditives peut se bloquer à l'adolescence pour des processus dont le développement est plutôt long.

Pour résumer, notre expérience devrait permettre d'amener des éléments étayant l'hypothèse selon laquelle l'autisme serait caractérisé par une perception et/ou une mémoire auditive surdéveloppée, de dissocier l'influence des facteurs mnésiques et perceptifs dans ces performances particulières, et d'étudier le développement des traitements auditifs chez des jeunes et des adultes porteurs d'autisme.

3.1 Méthode

La séance d'expérimentation était constituée d'un audiogramme, d'un test d'empan de chiffre (direct et inverse), ainsi que, comme nous l'avons mentionné plus haut, d'une tâche de détection de la périodicité pour mesurer la mémoire auditive, et d'une tâche de discrimination de bruit périodique dans un masqueur pour mesurer un indice de perception auditive décrite ci-dessous. L'audiogramme, ainsi que les tests en eux-mêmes ont été passés dans une cabine insonorisée.

Avant la première passation des deux tâches, chaque participant passait une séance d'entraînement lors de laquelle il apprenait ce qu'est un bruit périodique et un bruit non périodique. Les séances d'entraînement aux tâches de mémoire et de perception étaient constituées d'une première partie d'écoute simple de bruits périodiques (4 cycles pour la tâche de mémoire, 8 cycles pour la tâche de perception) et de bruits non périodiques, puis

d'une tâche de détection de la périodicité. L'expérience ne démarrait que quand le participant obtenait plus de 85% de bonnes réponses à la tâche d'entraînement. Nous étions ainsi sûrs que la tâche était complètement comprise et que tous les participants étaient capables de respecter les consignes.

3.1.1 Participants

12 enfants et adolescents porteurs d'autisme de haut niveau (âge moyen = 11 ans et 2 mois), 12 enfants et adolescents neurotypiques (âge moyen = 11 ans et 10 mois), 11 adultes porteurs d'autisme de haut niveau (âge moyen = 21 ans et 2 mois) et 14 adultes neurotypiques (âge moyen = 22 ans) ont pris part à cette expérience. Les âges chronologiques allaient de 8 à 15 ans pour les enfants et adolescents porteurs d'autisme, de 9 à 15 ans pour les enfants et adolescents neurotypiques, de 16 à 28 ans pour les adultes porteurs d'autisme et de 16 à 27 ans pour les adultes neurotypiques.

21 participants porteurs d'autisme ont été sélectionnés dans la base de données du CRA (Centre Ressources Autisme) Aquitaine de l'Hôpital Charles Perrens, et les 2 participants porteurs d'autisme restants ont été recrutés à l'ITEP Saint Vincent d'Eysines. Les critères d'exclusion étaient les suivants : un traitement pharmacologique, une comorbidité psychiatrique et un QI total (ou QI verbal ou performance si le QI total ne pouvait être calculé) inférieur à 70.

3.1.2 Test 1 : Etude des particularités mnésiques

Le participant entend un stimulus composé dans 50% des cas d'un bruit blanc périodique (construit par 4 répétitions d'un même segment de bruit blanc aléatoire d'une durée de 100 ms au début du bloc d'essais, soit un stimulus de 400 ms) ou dans les 50% des cas restants d'un bruit blanc aléatoire (d'une durée de 400 ms au début du bloc d'essai). L'auditeur est placé en face d'une interface graphique constituée de trois boutons, le premier servant à démarrer le bloc d'essais et les deux autres servant à répondre (Figure 3.1). Sur l'un d'eux, le mot périodique est écrit en toutes lettres, et sur l'autre, le mot périodique, également écrit en toutes lettres, est barré d'une croix. Le participant doit indiquer après la présentation de chaque stimulus si le son entendu est périodique ou ne l'est pas, en cliquant sur le bouton correspondant. A chaque essai, un feedback lui est donné, sous la forme d'une coloration verte du bouton sur lequel il vient de cliquer en cas de bonne réponse, ou d'une coloration rouge sinon, afin de donner un aspect ludique à la tâche.¹



En cas de bonne réponse, la période de répétition était allongée, augmentant ainsi la charge mnésique de l'exercice. En revanche, en cas de mauvaise réponse, la période de répétition diminuait (sans toutefois pouvoir descendre en deça de la période initiale de 100 ms par cycle). Les variations de la durée de chaque cycle étaient soumises aux règles d'une procédure adaptative, le SIAM (pour Single Interval Adjustment Matrix, Kaernbach 1990). On

1. merviti.ds-creation.fr/bruitpertest1.html pour écouter un exemple de son de test 1

mesure la valeur maximale de la durée de la période (en ms) pour laquelle la périodicité est tout juste détectée.

Une évaluation des capacités perceptives a également été réalisée en utilisant une tâche de discrimination pure.

3.1.3 Test 2 : Etude des particularités perceptives

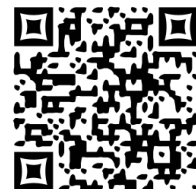
Dans cette tâche, le participant entend un son composé dans 50% des cas d'un bruit partiellement périodique, ou dans les 50% des cas restants d'un bruit blanc aléatoire.

Dans le cas d'un bruit blanc partiellement périodique, le stimulus est la somme d'un bruit non-périodique faisant office de masqueur et d'un bruit périodique de période courte (8 cycles de 100 ms). Le masqueur et le signal sont renouvelés d'un essai à l'autre. La durée de la période (100 ms) est volontairement très courte pour limiter au maximum les facteurs mnésiques et étudier majoritairement les facteurs perceptifs impliqués dans la réalisation de la tâche.²

L'interface graphique permettant la réponse est la même que dans le premier test, et l'auditeur doit à nouveau indiquer si le son qu'il vient d'entendre est périodique ou ne l'est pas en cliquant sur l'un ou l'autre des boutons.

Contrairement au test précédent, la durée de chaque cycle ne varie pas : en cas de bonne réponse, le volume relatif du signal par rapport au masqueur

2. merviti.ds-creation.fr/bruitpertest2.html pour écouter un exemple de son de test 2



(S/M) est diminué à l'essai suivant, ce qui rend la tâche plus difficile ; en cas de réponse fausse, S/M est augmenté. On mesure la valeur de S/M pour laquelle les signaux sont tout juste détectés.

S'il est classique d'affirmer qu'une tâche de discrimination d'un signal dans du bruit fait intervenir la perception auditive, les choses se compliquent un peu lorsque le signal à discriminer est un signal périodique de 800 ms au total. Nous avons choisi de créer un segment de bruit de 100 ms, et de le répéter 8 fois. Cette courte durée permet de limiter les facteurs mnésiques dans la mesure où pour des segments d'une durée inférieure à 250 ms, les petits événements saillants présents dans le bruit ne sont pas perceptibles par l'auditeur (Warren et al. 2001). En deçà d'une durée de 50 ms par cycle, nous tombons dans le domaine de la hauteur tonale (Guttman et Julesz 1963). 100 ms par cycle ont donc paru être un bon compromis, tant théoriquement, qu'après une multitude d'essais.

En revanche, si cette longueur de cycle limite la perception et de la mémorisation de petits éléments perceptifs saillants, les répétitions, au nombre de 8, allongent indubitablement le signal à détecter. Il est alors probable que sur 800 ms de bruit, une forme de mémoire intervienne dans la détection de la périodicité.

De la même façon, la réalisation de la tâche de mémoire fait intervenir une part de perception dans la mesure où la détection de la périodicité se fait par la perception de petits éléments saillants, leur mémorisation, et

la comparaison des petits éléments du segment suivant avec ceux déjà en mémoire.

Nos deux tâches font donc intervenir en parts variables de la perception et de la mémoire, et c'est la proportion de l'influence de chacune de ces fonctions qui permet de nommer les épreuves tâche de perception et tâche de mémoire.

Notons que ces deux tâches ont été présentées selon deux ordres possibles (l'un des deux ordres possibles étant choisi aléatoirement pour chaque nouveau participant), et précédés d'un court entraînement pour familiariser l'auditeur avec les stimuli et s'assurer qu'il différencie un bruit blanc périodique d'un bruit blanc qui ne l'est pas. La figure 3.1 constitue un résumé des différents stimuli, ainsi qu'un aperçu de l'interface.

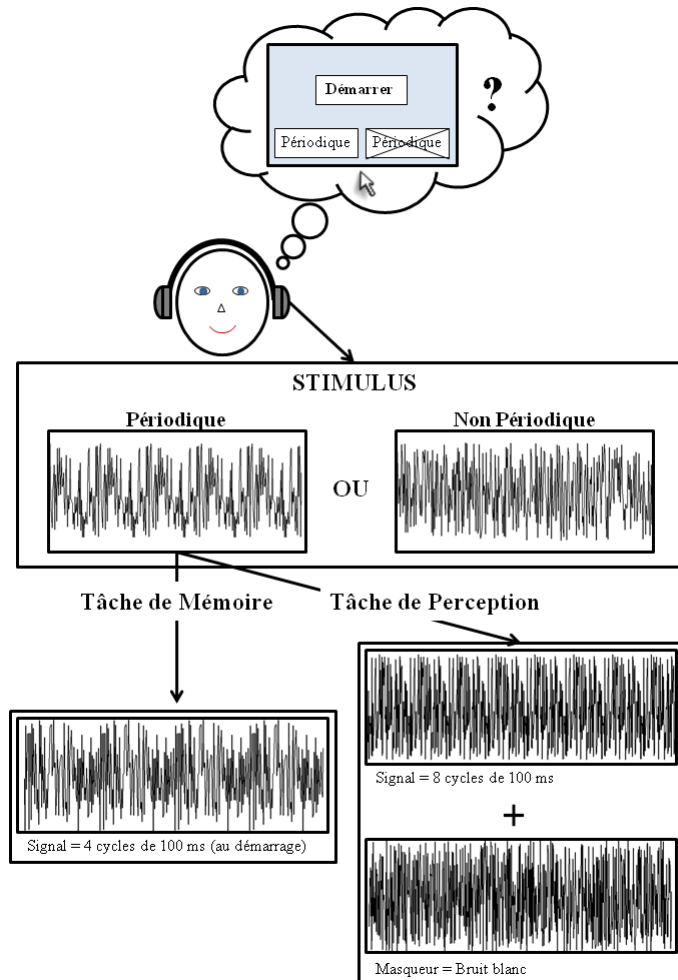


FIGURE 3.1 – Protocole expérimental. Quelle que soit la tâche, le participant entend un stimulus qui est soit périodique, soit non périodique, et doit indiquer s’il est périodique ou non en cliquant sur le bouton correspondant sur l’interface graphique. S’il réalise la tâche de mémoire, le bruit périodique est composé au démarrage, de 4 cycles de bruit blanc de 100 ms. S’il réalise la tâche de perception, le bruit périodique est composé de 8 cycles de bruit blanc de 100 ms mixé dans un segment de bruit blanc de 800 ms.

3.2 Résultats et discussion

L'unité de mesure des deux tâches n'étant pas la même (des millisecondes pour la tâche de mémoire, et des décibels pour la tâche de perception), les performances ont été transformées en z-score³ pour pouvoir les comparer.

Pour toutes les analyses statistiques, les facteurs principaux sont les suivants :

- tâche à deux modalités : tâche de mémoire, tâche de perception
- âge à deux modalités : enfants et adultes
- clinique à deux modalités : autisme et neurotypique

3.2.1 Peut-on dissocier perception et mémoire auditives ?

Dans un premier temps, une ANOVA à 3 facteurs [tâche $\times$ âge $\times$ clinique] a été calculée sur les performances transformées en z-score. L'interaction [Tâche $\times$ Age] s'est révélée significative ($F(1,45) = 4,705$; $P = 0.035$), indiquant que le développement a induit une plus grande hausse des performances dans la tâche de mémoire que dans la tâche de perception (Figure 3.2).

3. Le z-score correspond au nombre d'écart-types se situant au dessus ou en dessous de la moyenne du groupe. Il permet de comparer deux échantillons n'ayant pas la même unité. La formule pour le calculer est la suivante : $z\text{-score} = \frac{\text{moyenne}(\text{participant}) - \text{moyenne}(\text{groupe})}{\text{écart-type}(\text{groupe})}$ (Howitt D., Cramer D., 2008)

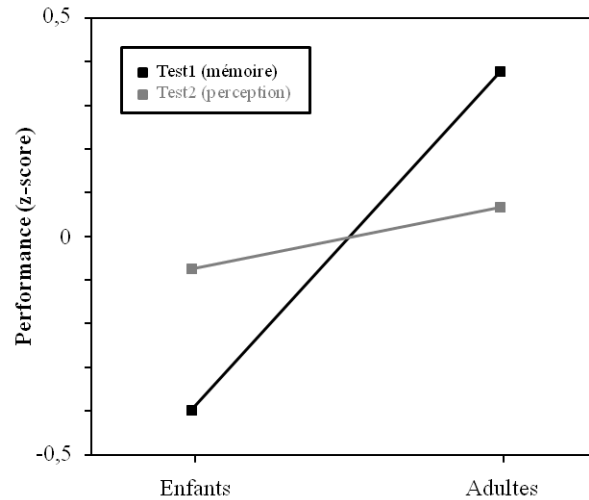


FIGURE 3.2 – Performances (transformées en z-score) des enfants et des adultes, en fonction de la tâche (tâche de mémoire en noir, tâche de perception en gris)

En revanche, l'interaction [Tâche $\times$ Clinique] n'est pas significative ($F(1,45) = 0,669$; $P = 0.418$), suggérant que les deux groupes de participants (porteurs d'autisme ou neurotypiques) ont obtenu des performances similaires dans les tâches de perception et de mémoire. L'interaction double [Tâche $\times$ Age $\times$ Clinique] s'est avérée ne pas être significative ($F(1,45) = 0,315$; $P = 0.578$), révélant qu'il n'y a pas de différence dans la performance entre mémoire et perception, quel que soit l'âge et que le participant soit porteur ou non d'autisme.

Bien que l'amélioration de la performance avec l'âge soit supérieure pour la tâche de mémoire que pour la tâche de perception, cette expérience ne permet pas de différencier deux processus pouvant sous-tendre les

deux fonctions cognitives que sont la perception et la mémoire auditives. En effet, si les 4 sous groupes répondant à chacune des modalités des deux facteurs impliqués (enfants porteurs d'autisme, enfants neurotypiques, adultes porteurs d'autisme, adultes neurotypiques) sont isolés, il apparaît que les performances dans les deux tâches de mémoire et de perception sont similaires, suggérant que les processus mis en jeu ne sont pas différents pour chacune d'entre elles. Sur la base de ce résultat, on ne pourrait donc pas dissocier perception et mémoire auditives. Ces deux fonctions seraient intrinsèquement liées.

Pour résumer : il ne semble pas y avoir de différence dans les tâches de perception et de mémoire auditives.

3.2.2 Différences entre les participants porteurs d'autisme et les participants neurotypiques

La littérature sur la perception auditive dans l'autisme laisse penser que les performances des participants porteurs d'autisme pourraient être meilleures que celles des participants neurotypiques dans la tâche de perception, celle de mémoire ou les deux tâches. Lors de l'analyse précédente, une autre interaction s'est avérée être significative : l'interaction [Age $\times$ Clinique] ($F(1,45) = 7,906$; $P = 0.007$, Figure 3.3). Ce résultat indique

que, toutes tâches confondues, les adultes neurotypiques ont de meilleures performances que trois autres groupes de participants.

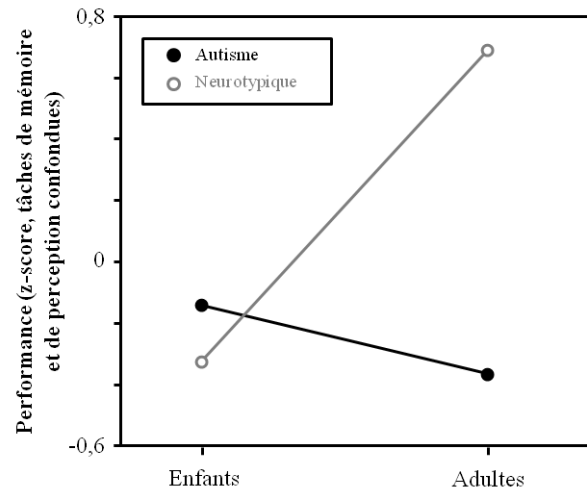


FIGURE 3.3 – Performances des enfants et des adultes transformées en z-score, toutes tâches confondues. Les groupes des participants porteurs d’autisme sont en gris, les groupes des participants neurotypiques sont en noir

Des analyses ont été réalisées pour savoir ce qu’il en était pour chaque tâche séparément, et sur les performances brutes (en ms pour la tâche de mémoire, et en dB pour la tâche de perception).

Concernant la tâche de mémoire, une ANOVA à deux facteurs [Age $\times$ Clinique] a été calculée sur les performances en millisecondes. L’analyse des résultats a montré :

- un effet principal de l’âge ($F(1,45) = 9,885$; $P = 0.003$), les adultes étant meilleurs que les enfants

- un effet principal du groupe, avec ($F(1,45) = 5,577$; $P = 0.023$), les participants neurotypiques étant meilleurs que les participants porteurs d'autisme
- une interaction [Age $\times$ Clinique] significative ($F(1,45) = 5,220$; $P = 0.027$), les adultes neurotypiques obtenant significativement de meilleures performances que les trois autres groupes (Figure 3.4).

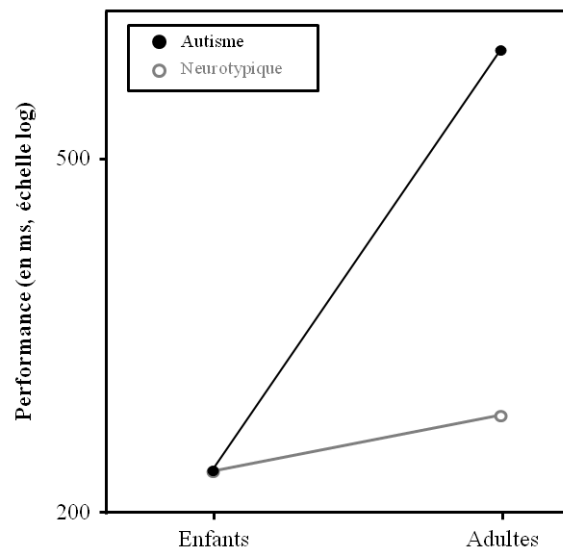


FIGURE 3.4 – Performances (en ms) des enfants et des adultes dans la tâche de mémoire. Les groupes des participants porteurs d'autisme sont en gris, les groupes des participants neurotypiques sont en noir.

Ce résultat a été détaillé en comparant les groupes deux à deux :

- Les performances des enfants porteurs d'autisme ne diffèrent pas de celles des enfants neurotypiques pour la tâche de mémoire ($t(22) = 0,067$; $P = 0.947$).

- Les adultes porteurs d'autisme ont obtenu des performances significativement inférieures à celles des adultes neurotypiques ($t(22) = 2.857$; $P = 0.009$).
- Les performances des adultes porteurs d'autisme sont similaires à celles de chacun des deux groupes d'enfants (vs. Enfants porteurs d'autisme : $t(21) = 0.644$; NS, vs. Enfants neurotypiques : $t(21) = 0.577$; NS).

Passons maintenant à la tâche de perception. Cette fois encore, une ANOVA à deux facteurs [Age $\times$ Clinique] a été calculée sur les performances en décibels. Cette analyse a révélé une interaction [Age $\times$ Clinique] significative ($F(1,45) = 6,522$; $P = 0.014$, figure 3.5), les adultes neurotypiques obtenant les meilleures performances.

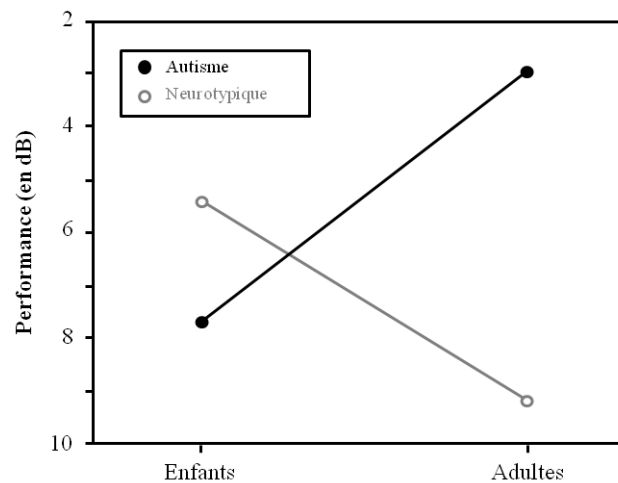


FIGURE 3.5 – Performances (en dB) des enfants et des adultes dans la tâche de perception. Les groupes des participants porteurs d'autisme sont en gris, les groupes des participants neurotypiques sont en noir.

Ce résultat a été détaillé en comparant les groupes deux à deux :

- les performances des enfants porteurs d'autisme ne diffèrent pas de celles des enfants neurotypiques ($t(22) = 0.985$; $P = 0.335$).
- les performances des adultes porteurs d'autisme sont inférieures à celle des adultes neurotypiques ($t(22) = -2,599$; $P = 0.016$).
- les performances des adultes porteurs d'autisme sont similaires à celles des deux groupes d'enfants, qu'ils soient porteurs d'autisme ou neurotypiques (vs. Enfants porteurs d'autisme : $t(21) = 1.421$; NS, vs. Enfants neurotypiques : $t(21) = 0.430$; NS).

Pour résumer : les adultes porteurs d'autisme présentent un «trouble» du traitement auditif que ne présentent pas les enfants porteurs d'autisme. En effet, il n'y a pas de différence, quelle que soit la tâche, entre les performances des enfants porteurs d'autisme et celles d'enfants neurotypiques. En revanche, les performances des adultes porteurs d'autisme sont significativement plus faibles que celles des adultes neurotypiques, et similaires à celles des enfants.

Pas de supériorité dans le traitement auditif des participants porteurs d'autisme

La première constatation que nous avons faite réside dans le fait que les performances des participants porteurs d'autisme n'ont jamais été supérieures à celles des participants neurotypiques. En ce qui concerne la première tâche (nommée tâche de mémoire), des performances supérieures de la part des participants autistes étaient attendues, dans la mesure où, comme cela a précédemment été détaillé, il est établi que la perception de la périodicité au-dessus de 250 ms par cycle se fait grâce à la détection de petits éléments dans le segment de bruit (Warren et al. 2001).

D'après Mottron et al. (2006), les personnes porteuses d'autisme présentent une perception du détail plus fine que celle de la globalité du percept. Il semblait naturel que les participants porteurs d'autisme perçoivent plus précisément ces petits détails présents dans le bruit. Si c'est réellement le cas, ce qui fera chuter la performance chez les participants porteurs d'autisme sera soit la mémorisation de ces petits éléments, soit la prise de décision révélant si les détails perçus sont identiques à ceux en mémoire. La troisième expérience de ce travail met en jeu des stimuli plus adaptés à l'étude de la perception du détail, en utilisant un phénomène auditif, l'effet de rehaussement (décrit par la suite).

Peut-on expliquer nos résultats par des stratégies de prise de décision différentes ?

Nous avons collecté pour chaque participant à chaque essai le nombre de détections correctes («hits», détection de la périodicité quand le stimulus était effectivement périodique), de fausses alarmes («false alarms», détection de la périodicité quand le stimulus n'était pas périodique), de rejets corrects («correct rejection», pas de détection de la périodicité quand le stimulus n'était pas périodique) et d'omissions («miss», pas de détection de la périodicité quand le stimulus était périodique).

La proportion de chacune des erreurs possibles a été recueillie («omissions» et «fausses alarmes») en calculant le rapport du nombre d'omissions sur le nombre de fausses alarmes pour chacun des groupes de participants. Une ANOVA à 2 facteurs [Age $\times$ Clinique] a ensuite été calculée sur ce rapport, ne révélant aucune différence entre les groupes ($F(1,45) = 2.782$, $P = 0.102$).

Cela suggère que la stratégie de prise de décision a été similaire pour chacun des groupes, les participants porteurs d'autisme ne se distinguant pas des participants neurotypiques sur la base de la prise de décision. L'explication de la baisse des performances chez les adultes porteurs d'autisme provient donc probablement d'un trouble dans la mémorisation.

Peut-on expliquer nos résultats par un trouble de la mémoire auditive ?

Si les études décrites précédemment suggéraient une mémoire auditive surdéveloppée chez les personnes porteuses d'autisme, elles concernaient à chaque fois la mémoire de la hauteur tonale. Or, la mémoire de la hauteur tonale est une forme spéciale de mémoire auditive. Ainsi, par exemple, la trace en mémoire de la hauteur tonale se dégrade moins rapidement que la trace en mémoire de l'intensité pendant les premières secondes suivant la présentation du stimulus (Clément et al. 1999).

Nos résultats suggèrent un déficit de mémoire auditive chez les adultes porteurs d'autisme.

Ces conclusions ont été portées dans le cas où il était bien établi que la perception du détail était plus fine chez les participants porteurs d'autisme. Cependant, dans notre deuxième tâche (mesurant des facteurs perceptifs), les adultes porteurs d'autisme présentent également des performances significativement inférieures à celles d'adultes neurotypiques. Les adultes porteurs d'autisme de haut niveau présentent peut-être, en plus d'un trouble mnésique, un «trouble» perceptif. Cela sera discuté ci-dessous.

Peut-on expliquer nos résultats par un trouble du traitement auditif ?

Si la littérature rapportait des performances supérieures à la moyenne dans le traitement auditif par les personnes porteuses d'autisme, cela

concerne majoritairement les sons purs. Pour des sons complexes, ce n'est pas toujours le cas. Dans nos deux tâches, nous avons utilisé des bruits blancs, soit les stimuli auditifs parmi les plus complexes qui existent.

Le traitement perceptif dans l'autisme serait régi par l'hypothèse de la complexité, selon laquelle les performances des personnes porteuses d'autisme sont supérieures à celles des neurotypiques pour des sons très simples, et qu'elles diminuent en fonction de l'augmentation de la complexité des stimuli à percevoir (Samson et al. 2006). En d'autres termes, plus un stimulus est complexe, plus le traitement auditif des personnes porteuses d'autisme se dégradera. Si cela semble vrai pour la vision (Samson et al. 2006), dans le domaine de l'audition, les études sont moins consensuelles. Les études portant sur la perception de sons complexes (par rapport aux sons simples comme les sons purs décrits précédemment) englobent l'analyse du traitement de sons à différents niveaux de complexité, mais aussi différentes tâches (catégorisation de hauteur, estimation d'intervalle, association entre hauteur et image, discrimination d'un signal dans du bruit etc.).

Dans une étude portant sur la catégorisation de hauteur, Heaton (2005) met en évidence une meilleure perception de la hauteur tonale chez des enfants porteurs d'autisme, en présentant des paires de sons (notes de piano) d'intervalles variables (de 1 à 12 demi-tons) à des enfants porteurs d'autisme et neurotypiques. Les participants doivent indiquer le plus rapidement possible le sens de la variation (montante ou descendante). L'analyse des résultats a mis en lumière une meilleure performance des enfants porteurs

d'autisme dans la discrimination de direction lorsque les intervalles étaient petits (1 à 4 demi-tons). En revanche, pour des intervalles plus grands, les performances entre les groupes sont similaires. De plus, contrairement aux enfants neurotypiques dont la performance est significativement moins bonne pour des petits intervalles, les enfants porteurs d'autisme ont des performances similaires quel que soit l'écart entre les deux sons de la paire, suggérant une discrimination plus fine de la hauteur tonale pour des sons complexes.

Notons que Semal et al. (2006) ont réalisé une expérience portant sur la sensibilité à la direction de la hauteur tonale dans laquelle ils ont observé que certains participants pouvaient détecter un petit changement de hauteur tonale (environ un quart de ton) entre deux sons, alors qu'ils étaient incapables d'identifier la direction de ce changement (montant ou descendant). En revanche, cette identification était possible en augmentant la taille de l'écart entre les deux sons (entre 1 et 4 demi-tons).

C'est précisément l'intervalle de fréquence pour lequel les participants neurotypiques de l'étude de Heaton étaient moins performants. Il est donc possible que certains des enfants neurotypiques participant à cette expérience soient incapables de catégoriser des intervalles de hauteur inférieurs à 4 demi-tons, alors qu'ils percevraient probablement les deux sons de l'intervalle comme différents. Il est probable que les performances des participants neurotypiques auraient été similaires si la tâche avait été de détecter des différences de hauteur et non pas d'identifier la direction de cette

différence. Il n'en reste pas moins que les enfants porteurs d'autisme de haut niveau semblent présenter des capacités de catégorisation de la hauteur plus performantes que les enfants neurotypiques pour de petits intervalles.

Gomot et al. (2008) suggèrent également une discrimination de la hauteur tonale supérieure chez des enfants porteurs d'autisme de haut niveau ou syndrome d'Asperger, dans une tâche de détection de nouveauté. 3 types de sons sont présentés aux participants : le stimulus standard (accord de 3 sons purs de fréquence 500, 1000 et 1500 Hz), le stimulus déviant (identique au stimulus standard mais avec 30% de changement de fréquence pour les composants) et le stimulus nouveau (différant du stimulus standard par sa composition, et de fréquences toujours différentes selon les essais). Les enfants ont pour consigne de presser une touche le plus rapidement possible lorsqu'ils entendent le stimulus nouveau. Il leur est toutefois demandé d'être précis plutôt que rapide. Cette tâche a également été proposée à des enfants neurotypiques appariés en âge, sexe et QI. L'analyse des résultats a montré que les temps de réaction au stimulus nouveau (en cas de bonne réponse) des enfants porteurs d'autisme ou de syndrome d'Asperger étaient significativement plus bas que ceux des enfants neurotypiques. Par ailleurs, les deux groupes de participants ont obtenu le même pourcentage de bonnes réponses. Ainsi, cela suggère une discrimination de la hauteur tonale supérieure (plus rapide) dans l'autisme. Ce résultat est assez étonnant dans la mesure où Holdnack et al. (2011) ont montré que l'autisme était caractérisé par une vitesse de traitement de l'information plus lente. Notons

que O’Riordan et Passetti (2006) avaient observé un temps de réponse plus long pour des enfants autistes de haut niveau que pour des enfants neurotypiques lors d’une tâche de discrimination de fréquence, sans que ce résultat ne puisse réellement être interprété totalement dans le sens d’une vitesse de traitement ralentie, ou réellement d’une discrimination plus fine de la fréquence.

Ces résultats vont être modérés par Heaton et al. en 2008, lors d’une tâche de discrimination d’intervalles de hauteurs. En effet, les auteurs ont proposé à des enfants porteurs d’autisme de haut niveau ($QI > 70$), de bas niveau ($QI < 70$) (Tsai, 1992) d’identifier des intervalles de hauteur tonale, en utilisant l’image d’un petit garçon montant ou descendant un escalier (8 marches), chaque marche de l’escalier correspondant à une note (soit, une octave représentée). Leurs performances ont été comparées à celles d’un groupe contrôle, composé d’enfants neurotypiques et d’enfants avec des difficultés d’apprentissage modérées appariés en âge et en score aux matrices de Raven aux enfants porteurs d’autisme de haut niveau et de bas niveau. Un intervalle de sons est proposé au participant. La première note de l’intervalle est matérialisée par le petit garçon, qui sera par défaut en haut ou en bas de l’escalier, selon que l’intervalle est descendant ou ascendant. L’enfant doit toucher la marche d’escalier correspondant à l’intervalle entendu. L’analyse des résultats n’a pas permis de mettre en évidence de différence entre les performances des enfants porteurs d’autisme, et celles des enfants du groupe contrôle. De même, les temps de réaction des enfants porteurs d’autisme ne

diffèrent pas de ceux des enfants du groupe contrôle. L'autisme ne semble donc pas être caractérisé par une meilleure discrimination des intervalles de hauteur. En revanche, 3 participants porteurs d'autisme, exclus des analyses que nous venons d'aborder, ont obtenu des performances allant de 4 à 5 écarts-types au dessus de la moyenne. Parmi ces 3 participants, deux étaient porteurs d'un autisme de haut niveau et présentaient un pic de performance au sous test «Cubes» de la WISC, alors que le troisième était porteur d'autisme de bas niveau bien que sa performance au sous test «Cubes» soit normale. Le sous test «Vocabulaire» de la WISC est un écart-type en dessous de la moyenne pour les trois participants. Ainsi, bien qu'aucun profil caractéristique n'unisse ces trois participants aux performances très supérieures, il semble que les capacités supérieures de perception de la hauteur tonale ne soient la particularité que d'un sous groupe de personnes porteuses d'autisme. Comme nous l'avons mentionné ci-dessus, Jones et al. (2009) identifiera également un sous groupe de jeunes porteurs d'autisme présentant des capacités de discrimination de fréquence supérieures à celles de jeunes neurotypiques.

Ainsi, cette perception plus «fine» ne représenterait peut-être pas l'intégralité de la population, mais peut-être simplement un sous-groupe de personnes porteuses d'autisme, ceux dont le fonctionnement est de haut niveau, et qui ont présenté un délai dans l'acquisition des premiers mots.

Perception de la complexité spectrale⁴

Le traitement de la complexité spectrale ne semble pas être altéré dans l'autisme de haut niveau. En effet, dans une tâche de discrimination de langage dans du bruit, Alcàntara et al. (2004) ont montré que les performances d'adultes porteurs d'autisme de haut niveau ou de syndrome d'Asperger, ne différaient pas de celles d'adultes neurotypiques dans les conditions où le masqueur était spectralement complexe. De même, Groen et al., en 2009, dans une tâche similaire (présentation d'un mot dans différentes conditions de bruit de fond, ces conditions étant différentes de celles d'Alcantara et al.), n'ont pas trouvé de différence dans la capacité d'adultes porteurs d'autisme de haut niveau ou de syndrome d'Asperger d'identifier le mot dans les conditions spectralement complexes (masquage par un bruit rose statique). Ces deux études utilisant des sons du langage ont ouvert la voie à deux études, plus récentes, utilisant des stimuli plus simples ne faisant pas intervenir de traitement sémantique.

Bonnel et al. en 2010 ont présenté des séries de deux paires de sons purs à des adultes porteurs d'autisme de haut niveau ou de syndrome d'Asperger, ainsi qu'à des adultes neurotypiques. Cette expérience comporte plusieurs conditions : une condition où les stimuli sont des sons purs, une autre où les stimuli sont des sons complexes. Dans l'une des paires, les deux sons étaient identiques, dans l'autre, le deuxième son était différent (fréquence

4. Un son spectralement complexe peut se définir comme ayant au moins deux composantes de fréquence, ou au moins une harmonique.

plus haute dans la condition sons purs, fréquence fondamentale plus haute pour la condition sons complexes). Les sujets avaient pour consigne de déterminer laquelle des deux paires contenait le son différent. Aucune différence significative n'a été révélée lors de l'analyse des performances des deux groupes de sujets.

Samson et al. (2010) ont également étudié le traitement de la complexité spectrale dans l'autisme de haut niveau en présentant à des adultes porteurs d'autisme de haut niveau ou de syndrome d'Asperger et à des adultes neurotypiques un son pur (de fréquence 300 Hz) ou un son complexe harmonique (fréquence fondamentale de 300 Hz et ses trois premières harmoniques). Ces sons pouvaient être modulés (3 conditions de modulation), ou statiques. Les participants devaient indiquer, en pressant une touche, si le son entendu était modulé ou non. La complexité spectrale n'a pas influé sur les réponses des participants : la modulation a été détectée de la même façon, que le stimulus soit un son pur ou un son complexe.

Si le traitement spectral du son semble préservé dans l'autisme, cela ne semble pas être le cas du traitement temporel.

Perception de la complexité temporelle⁵

Alcantara et al. (2004) ont présenté des mots dans différentes conditions de bruit de fond à des jeunes adultes porteurs d'autisme de haut niveau

5. Un son temporellement complexe se définit comme variant dans le temps. Par exemple, un son modulé en amplitude sera temporellement complexe.

ou de syndrome d'Asperger, et à des jeunes adultes neurotypiques. Dans l'une des conditions, des «dips» temporels étaient aménagés, c'est-à-dire des indices temporels permettant de reconstituer le mot. L'analyse des résultats a permis de voir que les jeunes porteurs d'autisme n'exploitaient pas les «dips» temporels aussi bien que les jeunes neurotypiques. Groen et al (2009), ont montré que les adultes porteurs d'autisme de haut niveau ont une capacité diminuée à intégrer les fragments d'informations auditives présentes dans les «dips» temporels suggérant un traitement temporel de l'information auditive altéré.

En 2012, Alcantara et al. appuient cette hypothèse en tentant de déterminer si les enfants porteurs d'un syndrome d'Asperger présentent un traitement déficitaire de l'enveloppe temporelle des sons. Dans cette expérience, les auteurs ont présenté trois bruits (2 non modulés, 1 dont l'enveloppe temporelle est modulée en amplitude) aux participants. Ils leurs ont ensuite demandé d'indiquer quel était le bruit modulé, en variant la profondeur de la modulation selon une procédure adaptative. L'analyse des résultats montre que les seuils de profondeur de modulation sont plus hauts chez les enfants porteurs d'autisme, suggérant que l'efficacité du traitement des modulations de fréquence est réduite et donc que le traitement de l'enveloppe temporelle des sons est déficitaire dans l'autisme.

Cette altération du traitement temporel n'a pas été retrouvée par Bonnel et al. (2010). En effet, dans une étude déjà citée ci-dessus, l'augmentation

de la complexité temporelle n'a pas altéré la performance de jeunes adultes porteurs d'autisme de haut niveau, ni celles de jeunes adultes porteurs du syndrome d'Asperger.

Perception de la complexité spectro-temporelle. Les individus porteurs d'autisme de haut niveau ou de syndrome d'Asperger présentent un traitement normal de sons à la fois spectralement et temporellement complexes. En effet, Groen et al. (2009) n'ont pas mis en évidence de différence entre les performances d'enfants et adolescents porteurs d'autisme ou de syndrome d'Asperger et neurotypiques dans une tâche de détection de mot dans un fond sonore spectro-temporellement complexe. De même, les performances de jeunes adultes porteurs d'autisme ou de syndrome d'Asperger dans des tâches de détection de modulation spectrotemporelle ne diffèrent pas de celles de jeunes adultes neurotypiques dans l'étude de Bonnel et al. (2010) précédemment citée.

Pour résumer, la perception (mesurée par des tâches de discrimination et de catégorisation de fréquence) des sons simples semble être supérieure chez les personnes porteuses d'autisme. Lorsque les sons se complexifient, un déficit dans le traitement de l'aspect temporel des sons semble apparaître. Nos résultats peuvent donc potentiellement être expliqués par un déficit dans le traitement temporel de nos sons complexes.

Mise en évidence d'un «trouble» dans le développement des traitements auditifs

Notre deuxième constatation a été la suivante : les enfants porteurs d'autisme présentent des performances similaires à celles des enfants neurotypiques, alors que les performances des adultes porteurs d'autisme sont significativement inférieures à celles des adultes neurotypiques.

Une des raisons pour lesquelles les adultes neurotypiques présentent des performances significativement supérieures dans nos deux tâches pourrait résider en une attention plus soutenue, une meilleure concentration. Nous avons étudié cette hypothèse en observant la variabilité de chaque participant dans les tâches de perception et de mémoire, chaque tâche étant réalisée 3 fois. Une grande variabilité indiquerait que le participant a été distrait sur un essai donné, ou qu'il n'a pas soutenu son attention suffisamment longtemps (Wightman et al. 1989 ; Dawse et al. 2008). Les adultes neurotypiques, obtenant les meilleures performances, devraient donc présenter une variabilité plus faible que les trois autres groupes de participants.

Pour mesurer cela, nous avons comparé l'écart-type à la moyenne des trois essais pour chaque tâche des quatre groupes de participants, à l'aide d'une ANOVA à deux facteurs [Age $\times$ Clinique]. L'analyse des résultats n'a pas permis de mettre en évidence de différence dans l'implication des facteurs non sensoriels entre les adultes neurotypiques et les 3 autres groupes ($F(1,45) = 2.782$, $P = 0.102$).

Si nos résultats ne peuvent s'expliquer par des facteurs non sensoriels, cela suggère que le développement des capacités auditives est normal durant l'enfance et l'adolescence des personnes porteuses d'autisme, et qu'il se détériorerait ou s'arrêterait avant l'âge adulte. Nos stimuli étant composés de bruit blanc, leur perception dépend probablement de la résolution temporelle et de la détection de fluctuations d'intensité. Dans le développement neurotypique, la résolution d'amplitude est mature assez précocement (Werner 2007), les performances des enfants étant similaires à celles des adultes à 10 ou 11 ans. La résolution temporelle des enfants est du niveau des adultes à 5 ou 6 ans (Werner 2007). La moyenne d'âge des enfants participant à la tâche est d'environ 12 ans. Ils possèdent les capacités perceptives de réaliser nos tâches. Ce serait donc la mémoire auditive qui limiterait leurs performances, et qui, pleinement développée à l'âge adulte (pour les adultes neurotypiques), permettrait une telle supériorité dans les performances.

La mémoire sensorielle auditive semble donc être un processus dont la maturation est lente. De plus, il semble que son développement soit normal jusqu'à un certain âge dans l'autisme (puisque nos deux groupes d'enfants ont des performances similaires), mais qu'à un moment donné, il s'arrête (les performances des adultes porteurs d'autisme étant similaires à celles des enfants, et très inférieures à celles des adultes neurotypiques).

Bien que l'autisme soit un trouble du développement, il n'existe aucune étude observant le développement de la perception ou de la mémoire dans l'autisme, comme nous l'avons déjà indiqué précédemment. En effet, les études portent soit sur une population d'enfants porteurs d'autisme, soit sur une population d'adultes porteurs d'autisme, mais ce paramètre n'est jamais pris en compte dans les discussions et les comparaisons que peuvent faire ces études entre elles. Pourtant, il existe au moins une pathologie pour laquelle le développement du traitement auditif est normal jusqu'à l'adolescence, puis s'arrête pour ne jamais repartir pour certains aspects : les troubles de l'apprentissage basés sur le langage (LP) (Wright et Zecker 2004). Cependant, contrairement à cette étude où le développement auditif est retardé même durant l'enfance dans cette pathologie, l'analyse de nos résultats montre que les enfants porteurs d'autisme ne présentent pas de retard dans le développement, au moins à partir de 8 ans (âge minimum requis pour passer nos expériences). Une explication possible serait celle d'un plateau où le développement stagnerait quelques mois. En deçà de ce plateau, le développement des enfants porteurs d'autisme serait retardé, puis le retard serait rattrapé entre 8 et 15 ans, pour reprendre chez les neurotypiques, et rester au même niveau chez les personnes porteuses d'autisme.

Pour résumer : Notre étude n'a pas permis de dissocier la perception de la mémoire sensorielle auditive, toutefois, un «trouble» dans le développement de la mémoire auditive et/ou de la perception auditive chez des adultes porteurs d'autisme de haut niveau (non imputable à des facteurs non sensoriels) a été mis en évidence, avec des performances normales jusqu'à la fin de l'adolescence, et un arrêt du progrès conduisant à un déficit chez les adultes autistes de haut niveau qui conservent des seuils similaires à ceux des enfants, quand les adultes neurotypiques présentent des seuils bien supérieurs.

N'étant pas parvenus à identifier si ce trouble était plutôt de nature mnésique, perceptive, ou les deux, nous avons poursuivi nos recherches sur la perception et la mémoire sensorielle auditive en utilisant un deuxième outil, le rehaussement auditif.

Chapitre 4

Le phénomène du rehaussement

Sommaire

4.1	Comment expliquer cet effet ?	86
4.1.1	Rehaussement d'intensité	86
4.1.2	Rehaussement de fréquence	88
4.2	Le rehaussement d'intensité et le rehaussement de fréquence sont-ils sensibles de façon égale à l'interférence (1) ?	91
4.2.1	Objectif et méthode	91
4.2.2	Résultats et discussion	94
4.3	Le rehaussement d'intensité et le rehaussement de fréquence sont-ils sensibles de façon égale à l'interférence (2) ?	97
4.3.1	Objectifs et Méthode	97

4.3.2	Résultats et discussion	98
4.4	Le mode de présentation (ipsi ou controlatéral) affecte-t-il le rehaussement d'intensité et le rehaussement de fréquence de la même façon ? .	99
4.4.1	Objectifs et méthode	99
4.4.2	Résultats et discussion	100
4.5	Discussion	103
4.6	Article publié dans Journal of American Society of America (2011)	107

La mémoire sensorielle auditive peut être mise en évidence par l'utilisation d'un phénomène auditif particulier : le phénomène du rehaussement.

Le rehaussement se produit lorsque l'audibilité d'un composant cible donné dans un complexe de sinusoïdes d'amplitudes égales et dont les fréquences sont liées par des rapports harmoniques est augmentée par l'exposition à ce même complexe dans lequel le composant cible est absent. En d'autres termes, ce composant cible, absent du premier accord de sons purs, sera perçu comme plus intense dans le second accord de sons purs (Figure 4.1).¹

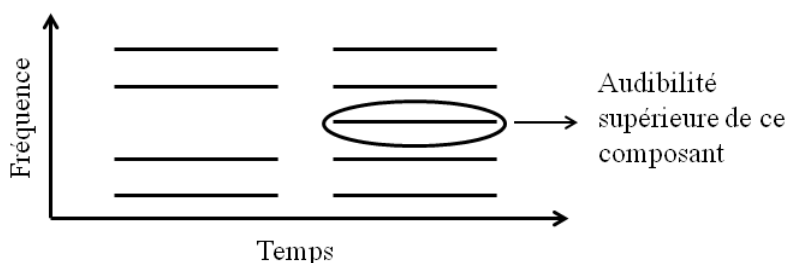


FIGURE 4.1 – Effet de rehaussement, à l'aide de deux complexes de sons purs. Le composant-cible (entouré) est perçu de façon plus intense que les autres composants du deuxième accord si ce dernier est précédé d'un premier accord dans lequel ce composant cible est absent.

Cet effet se produit avec un grand nombre de stimuli différents : par exemple, la présentation successive d'un bruit blanc à trou spectral et d'un

1. merviti.ds-creation.fr/rtintensite.html pour écouter un exemple de rehaussement d'intensité

bruit blanc induit la perception d'une bande de bruit (correspondant au trou spectral) dans le bruit blanc (Viemeister 1980).

Dans la suite de ce travail, le premier son de la séquence produisant l'effet de rehaussement sera appelé « Précurseur », et le second « Test ». Notons que le rehaussement est également possible quand au lieu de faire varier l'intensité de la cible à rehausser (rehaussement d'intensité), c'est la fréquence de la cible qui varie (rehaussement de fréquence) (Figure 4.2).²

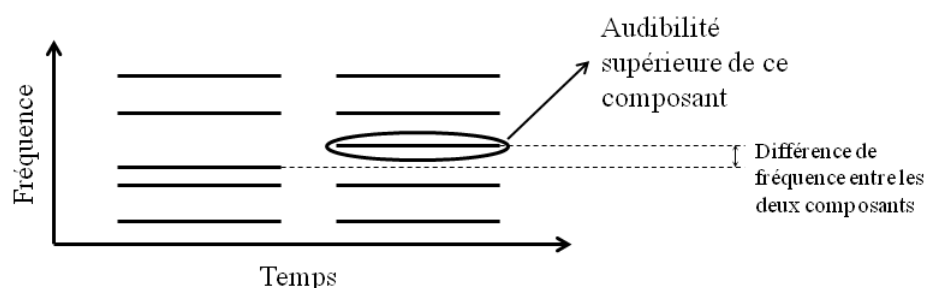
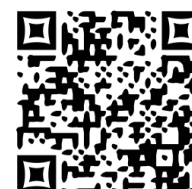


FIGURE 4.2 – Effet de rehaussement de fréquence, à l'aide de deux complexes de sons purs. Le composant-cible (entouré) est perçu de façon plus intense que les autres composants du deuxième accord si ce dernier est précédé d'un premier accord dans lequel ce composant cible est caractérisé par une fréquence inférieure. Ici, la différence entre les fréquences du composant cible est matérialisée par des lignes en pointillés.

Le phénomène de rehaussement fait intervenir la mémoire sensorielle auditive dans la mesure où il repose sur la présentation successive de deux accords. Le deuxième accord présenté seul ne permet pas de distinguer les

² merviti.ds-creation.fr/rtffrequency.html pour écouter un exemple de rehaussement de fréquence



différents composants. En d'autres termes, c'est l'effet de la perception du premier accord qui modifiera la perception du deuxième accord. La trace mnésique du premier accord aura une influence sur le traitement du deuxième accord. Ce phénomène est automatique, se produit hors de la conscience du sujet, même en présence d'un silence entre les deux sons.

Il y a plusieurs explications possibles à l'effet de rehaussement, qui seront décrites dans la suite de ce travail. Il est raisonnable de penser que les deux types de rehaussement (d'intensité et de fréquence) ne sont pas basés sur les mêmes mécanismes. En effet, si l'adaptation neuronale semble être privilégiée pour expliquer le rehaussement d'intensité, les détecteurs de variation de fréquence (FSD) pourraient être à la base du rehaussement de fréquence.

Les FSD ont été mis en évidence par Demany et al. (2005) dans une étude où des participants pouvaient identifier la direction d'un changement de fréquence alors même qu'ils n'avaient pas conscience de l'avoir perçu. Leur nature physiologique reste encore ignorée, mais il semble avéré qu'il existe dans le système auditif des détecteurs de variation de fréquence qui répondraient préférentiellement pour une direction de changement de fréquence.

Comme cela a déjà été mentionné précédemment, Bonnel et al. (2003) ont mis en évidence une supériorité des participants porteurs d'autisme de haut niveau dans la catégorisation de fréquences. De même, Heaton (2005), avait observé que des enfants porteurs d'autisme de haut niveau parvenaient

mieux à identifier le sens d'un changement de hauteur tonale après avoir écouté une paire de sons.

Semal et al. (2006) ont émis l'hypothèse selon laquelle les FSD pourraient participer à l'identification du sens de la variation de fréquence lors de la perception de deux sons. Une explication alternative à celles qui ont été proposées précédemment serait que les personnes porteuses d'autisme bénéficieraient de FSD plus performants, ce qui entraînerait une catégorisation (ou identification) plus fine de la hauteur tonale. Cela expliquerait qu'ils présentent des performances similaires à celles des personnes neurotypiques lors de la réalisation de tâches où les stimuli, plus complexes, ne font pas intervenir uniquement le traitement de la fréquence, et donc, les FSD.

Le rehaussement, et plus particulièrement le rehaussement de fréquence semble donc être un outil adapté pour étudier la mémoire sensorielle auditive chez des personnes autistes. Il est donc essentiel de clarifier ce qui distingue le rehaussement d'intensité du rehaussement de fréquence, et notamment en termes de mécanismes sous tendant ces deux phénomènes.

4.1 Comment expliquer cet effet ?

4.1.1 Rehaussement d'intensité

Deux explications au rehaussement d'intensité ont été proposées : l'hypothèse de l'adaptation neuronale (Viemeister, 1980 ; Summerfield et al. 1987 ; Palmer et al. 1995 ; Serman et al. 2008) et l'hypothèse de l'adaptation de l'inhibition (Viemeister et al. 1982 ; Nelson et al. 2010 ; Byrne et al. 2011). Prenons le cas d'un exemple d'effet de rehaussement produit par deux complexes de sons purs inharmoniques pour illustrer ces deux hypothèses. Le précurseur est un accord composé de 4 sons purs d'intensité égale, et le test est un accord composé des mêmes 4 sons purs additionnés du composant cible. Les 5 composants du test sont de même intensité, ainsi, si le test seul est écouté, aucun son n'est perçu davantage que les autres. Que se passe-t-il au niveau neuronal lorsque la séquence précurseur – test est écoutée ?

Le système auditif est caractérisé par son organisation tonotopique. La tonotopie est la représentation ordonnée de la fréquence d'un stimulus depuis la cochlée jusqu'aux aires auditives. En d'autres termes, à chaque étage du système auditif, l'emplacement de l'activité évoquée par un son pur varie systématiquement et régulièrement avec la fréquence de ce son. Ainsi, des groupes de neurones différents vont répondre spécifiquement à chaque fréquence, ils ont ce que l'on appelle une fréquence caractéristique.

Dans l'hypothèse de l'adaptation : lors de l'écoute du précurseur, les groupes de neurones dont la fréquence caractéristique est celles des composants vont s'activer. Lors de la présentation du test, les mêmes groupes de neurones vont à nouveau s'activer, mais cette activation sera plus faible, c'est l'effet d'adaptation neuronale. En effet, au début d'un son, les neurones auditifs produisent un pic d'activité qui diminue avec le temps. Quand le son se termine, l'activité neuronale retombe en dessous de son activité spontanée pendant une centaine de millisecondes. Ces neurones sont dits « adaptés ». En revanche, le groupe de neurones dont la fréquence caractéristique est celle du composant cible sera activé pour la première fois. Ces neurones n'étant pas adaptés, leur activation sera plus forte que celle des neurones codant pour les fréquences des autres composants. Ainsi, c'est le pic d'activation des neurones dont la fréquence caractéristique est celle du composant cible (donc non adaptés) qui entraînerait la perception de ce son pur en particulier dans l'accord.

Dans l'hypothèse de l'adaptation de l'inhibition : ici, le rehaussement serait dû à un affaiblissement des capacités des composants non-cibles à inhiber le son cible. En d'autres termes, les neurones s'activant pour les composants non-cibles exercent une inhibition sur les neurones s'activant pour les fréquences adjacentes (inhibition latérale), diminuant ainsi leur perception. La présentation du précurseur entraîne une diminution (liée à l'adaptation) de l'inhibition que les composants non cibles du masqueur

exercent sur le composant cible. Ce dernier est donc perçu comme plus intense.

4.1.2 Rehaussement de fréquence

Le rehaussement de fréquence est dû à une variation de la fréquence du composant cible entre le précurseur et le test. Lors de l'écoute de la séquence précurseur-test, une augmentation du niveau d'excitation des neurones dont la fréquence caractéristique est celle des composants devrait se produire. Ainsi, cette forme de rehaussement pourrait avoir les mêmes origines que le rehaussement d'intensité. Pourtant une autre explication peut être envisagée, celle de l'implication des FSD, décrits ci-dessous.

Van Noorden (1975) a suggéré que le système auditif contiendrait des détecteurs automatiques de changement spectraux. Ces détecteurs auraient pour rôle de lier les éléments sonores successifs en un objet sonore global émanant d'une même source. Plusieurs études plus récentes ont montré qu'il existerait dans le système auditif des détecteurs de changement de fréquence («frequency shift detectors» ou FSD). Demany et al. (2005) ont mis en évidence un phénomène surprenant, selon lequel un individu est capable d'identifier la direction d'un changement de fréquence entre deux sons purs successifs sans avoir perçu consciemment d'un de ces deux sons. Ce phénomène a été observé en présentant une séquence de deux stimuli à plusieurs participants. Le premier stimulus était un accord de 5 sons purs

d'intensité égale. Les composants de cet accord étaient des sons purs résolus dans la cochlée (c'est-à-dire qu'ils étaient tonotopiquement séparés les uns des autres). Dans la première condition expérimentale, le second stimulus était un son pur, dont la fréquence était soit identique à celle de l'un des composants de l'accord, soit situé à mi chemin entre deux composants. Le participant devait indiquer si le son pur était ou non présent dans l'accord (tâche présent/absent). Dans la deuxième condition expérimentale, le son pur était positionné aléatoirement d'un demi ton plus haut ou plus bas que l'un des composants de l'accord. Le participant devait indiquer la direction du changement de fréquence (monte/baisse). L'analyse des résultats a montré que, de façon surprenante, les seuils dans la tâche « monte/baisse » ont été significativement meilleurs que ceux de la tâche « présent/absent ». Ainsi, bien qu'il ne soit pas possible de distinguer les différents composants de l'accord présenté, les participants sont parvenus à identifier la direction du changement de fréquence d'un son pur, quand ils ont été incapables de déterminer si ce son était présent ou non dans l'accord.

Dans cette étude, Demany et al. (2005) ont détaillé les propriétés des FSD en trois hypothèses : « Le système auditif contient deux sous-ensembles de FSD, qui ont des préférences directionnelles opposées, l'un répond préférentiellement à des augmentations de fréquence, l'autre à des baisses. Chacun des deux sous-ensembles de FSD répond maximale-ment à de petits changements de fréquence. Lorsqu'une séquence sonore active simultanément

les deux sous-ensembles de FSD, la direction perçue du changement est celle que préfère le sous-ensemble dont l'activation est la plus forte».

Ainsi, les performances des participants de l'expérience précédemment décrite peuvent s'interpréter de la façon suivante : lors de la tâche «présent/absent», les deux sous-ensembles de FSD étaient activés simultanément avec la même force. En revanche, lors de la tâche «monte/baisse», chaque séquence «accord – son pur» activait un sous-ensemble plutôt que l'autre, indiquant la bonne réponse au participant. Le rehaussement de fréquence, apparaissant lorsque deux accords successifs présentent une variation de fréquence d'un de leurs composants, pourrait vraisemblablement être le fruit de l'activation des FSD. Cette hypothèse est testée dans les expériences suivantes.

Dans les trois expériences constituant cette étude, des précurseurs et des tests constitués d'accords inharmoniques de sons purs résolus dans la périphérie auditive ont été utilisés. Dans les expériences 1 et 2, le précurseur et le test étaient séparés soit par des silences, soit par du bruit rose, et l'effet du bruit sur le rehaussement d'intensité et sur le rehaussement de fréquence a été évalué. Si le rehaussement d'intensité est basé sur l'adaptation neurale, la perception du bruit devrait être néfaste sur le rehaussement dans la mesure où il produirait une adaptation non sélective des neurones à fréquence sélective. D'autre part, si le rehaussement de fréquence est dû aux FSD, le bruit ne devrait avoir qu'un léger effet sur cette forme de rehaussement. Dans l'expérience 3, le précurseur et le test sont présentés soit dans la même oreille, soit dans les oreilles opposées. D'après la littérature (Viemeister, 1980 ;

Summerfield et al. 1987; Serman et al. 2008), le rehaussement d'intensité ne devrait pas être observé. Si les FSD sont bien à la base du rehaussement de fréquence, ce dernier devrait être grandement réduit quand le précurseur et le test sont présentés aux oreilles opposées.

4.2 Le rehaussement d'intensité et le rehaussement de fréquence sont-ils sensibles de façon égale à l'interférence (1) ?

4.2.1 Objectif et méthode

Le but de cette expérience était de déterminer si le rehaussement d'intensité et le rehaussement de fréquence sont affectés de façon égale par l'insertion d'un bruit rose entre le précurseur et le test. Comme cela a été mentionné précédemment, toutes les fréquences sont représentées dans le bruit rose. Selon l'hypothèse de l'adaptation, l'insertion d'un tel bruit devrait adapter tous les neurones, et ainsi empêcher l'effet de rehaussement. Pour cela, le rehaussement a été mesuré dans six conditions différentes dans lesquelles le précurseur et le test étaient des accords de cinq sons purs synchrones. La séquence était constituée d'une répétition de l'enchaînement précurseur test, soit 4 accords à la suite (Figure 4.3). Le rehaussement a été objectivé en ajoutant à la suite du dernier accord un son pur qui était soit de même fréquence que le composant cible, soit d'une fréquence intermédiaire

entre deux composants adjacents. La performance a été évaluée en utilisant une tâche «présent/absent».

Deux conditions parmi les six faisaient intervenir du rehaussement d'intensité. Dans le précurseur, un des composants (le composant cible) était caractérisé par une intensité inférieure à celles des autres composants. Dans le test, les 5 sons avaient une intensité égale. La différence entre les deux conditions de rehaussement d'intensité résidait dans la présence ou non de bruit rose entre les accords de sons purs. Deux autres conditions faisaient intervenir du rehaussement de fréquence. L'intensité de chacun des composants était la même, en revanche, la fréquence du composant cible était différente entre le précurseur et le test (la fréquence du composant cible était d'un demi ton supérieure dans le test). Comme dans les conditions précédentes, la différence entre les deux conditions de rehaussement de fréquence résidait dans la présence ou non de bruit rose entre les accords de sons purs. Les deux dernières conditions étaient des conditions contrôles dans lesquelles aucun rehaussement n'était produit. En effet, le précurseur et le test étaient constitués des mêmes composants, aux mêmes fréquences et intensités. Toutefois, comme dans les conditions précédentes, la différence entre les deux conditions contrôles résidait dans la présence ou non de bruit blanc entre les accords de sons purs.

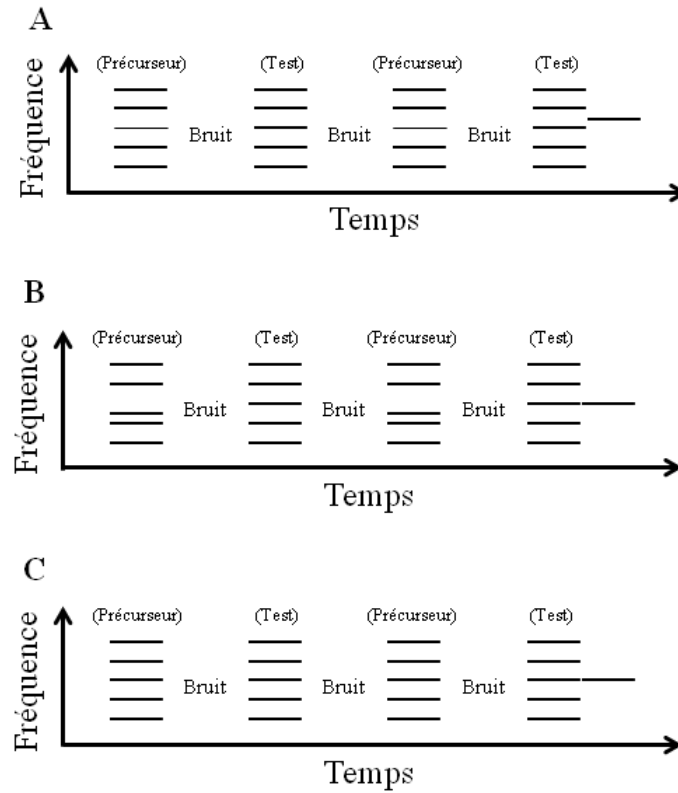


FIGURE 4.3 – Exemples de séquences de stimuli, dans les conditions avec insertion de bruit rose entre les accords. A : Rehaussement d'intensité. La réponse à cette séquence est «absent» (la fréquence du son pur suivant le dernier accord est différente de celles de ses composants. B : Rehaussement de fréquence. La réponse à cette séquence est «présent» (la fréquence du son pur suivant le dernier accord est identique à celle du composant cible). C : Condition contrôle, aucun effet de rehaussement, précurseurs et tests sont identiques. La réponse à cette séquence est «présent».

Notons que l'objectif de l'étude étant de comparer le rehaussement d'intensité et le rehaussement de fréquence, mais en aucun cas de comparer les

performances des différents participants entre eux, l'expérience a été précédée de séances d'ajustement de la difficulté afin que tous les participants aient un niveau de performance similaire. Ainsi, pour chaque participant, la différence d'intensité des composants cibles du précurseur et du test ont été variées dans la condition «rehaussement d'intensité sans bruit» de façon à ce que la performance, exprimée en d' ³, soit égale environ à 2,5 (environ 90% de réussite). Dans la condition faisant intervenir le rehaussement de fréquence sans bruit rose intercalé entre le précurseur et le test, c'est la durée de la stimulation qui a été variée, de façon à ce que la performance exprimée en d' soit environ de 2,5 (pour plus de détails sur la méthode, se référer à l'article p. 102).

4.2.2 Résultats et discussion

Les conditions avec rehaussement ont été mieux réussies que la condition sans rehaussement (Figure 4.4).

3. L'indice de discriminabilité (noté d') est un indice de la facilité avec laquelle le signal est détecté. Il représente la capacité sensorielle du participant. Il dépend du nombre de fausses alarmes et de détections correctes. Plus sa valeur est élevée, plus le signal est détecté facilement (Green et al. 1974)

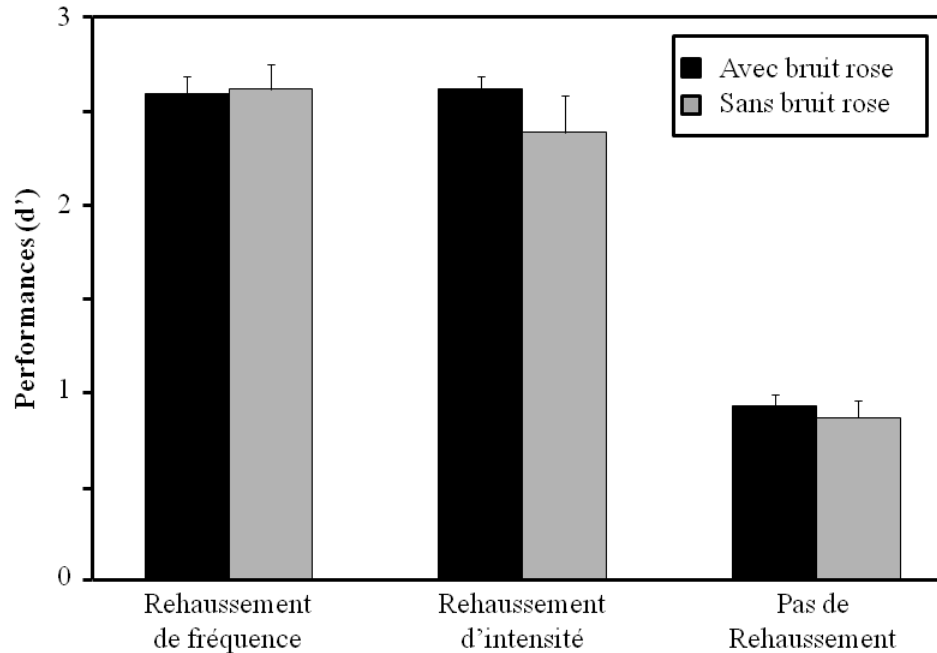


FIGURE 4.4 – Performances moyennes (exprimées en d' , avec erreur-type) selon le type de rehaussement, et l'insertion ou non d'un bruit rose entre les accords. Les performances dans les conditions avec rehaussement sont supérieures à celles des conditions sans rehaussement. L'insertion du bruit n'a pas provoqué de grande différence entre les conditions avec insertion du bruit et sans insertion.

L'analyse des résultats a été réalisée en calculant une ANOVA à 2 facteurs [Type de changement $\times$ Interférence], révélant un effet principal significatif du facteur Type de changement ($F(2,8) = 88,2$; $P = 0,000$), les performances dans les conditions avec rehaussement étant meilleures que celles sans rehaussement.

En revanche, aucun effet du facteur interférence n'a pu être mis en évidence ($F(1,4) = 2,55$; $P = 0,19$), suggérant que l'insertion d'un bruit rose entre les accords de sons n'a pas eu d'effet sur la perception du rehaussement.

L'interaction n'était pas significative ($F(2,8) = 0,296$; $P = 0,752$).

L'hypothèse selon laquelle le rehaussement d'intensité provenait uniquement de l'adaptation neuronale prédisait que les performances seraient inférieures pour la condition avec bruit interférent. En effet, comme cela a été mentionné précédemment, la perception du précurseur devrait activer les neurones dont la fréquence caractéristique est celle des composants de l'accord. La perception du bruit rose devrait activer tous les neurones auditifs (toutes les fréquences étant représentées dans le bruit rose). Ainsi, lors de l'écoute du test, les neurones répondant préférentiellement à la fréquence du composant cible devraient être adaptés, comme les neurones répondant préférentiellement aux fréquences des autres composants. Il ne devrait donc pas y avoir de rehaussement. Pourtant, les performances dans les conditions avec et sans insertion de bruit rose ont été similaires ($t(4) = 1,08$; $P = 0,17$). Bien que le bruit interférent fût plus intense que les accords, il est possible que son intensité soit encore insuffisante pour réduire significativement la sélectivité de l'adaptation produite par le précurseur, et empêcher l'effet de rehaussement. C'est l'hypothèse que nous allons tester dans l'expérience suivante.

4.3 Le rehaussement d'intensité et le rehaussement de fréquence sont-ils sensibles de façon égale à l'interférence (2) ?

4.3.1 Objectifs et Méthode

La deuxième expérience a été réalisée dans le but de déterminer si le rehaussement d'un des composants du test pouvait être annulé par l'insertion (entre le précurseur et le test) d'un bruit rose ajusté en intensité de façon à ce que le bruit masque complètement les composants du précurseur s'ils avaient été présentés dans le bruit. L'expérience 2 était constituée de trois tâches différentes, une condition contrôle où aucun rehaussement ne se produisait, une condition faisant intervenir du rehaussement d'intensité, et une condition dans laquelle du rehaussement de fréquence se produisait. Chacune de ces tâches était composée d'un précurseur, d'un bruit rose, d'un test et d'un son pur. Ce son pur pouvait être de la même fréquence que le son rehaussé dans les conditions avec rehaussement, et un des composants centraux dans la condition sans rehaussement, ou une fréquence intermédiaire entre deux composants. La tâche était une tâche «présent/absent». Contrairement à l'expérience précédente, aucun ajustement individuel n'était prévu. Les stimuli étaient de 300 ms pour tout le monde, quand dans l'expérience 1 (dans la condition avec rehaussement de fréquence) un ajustement de la durée des accords était réalisé. L'intensité des accords et celle du bruit étaient

équilibrées de façon à ce qu'un des composants présenté isolément dans le bruit soit indétectable (pour plus de détails sur la méthode, se référer à l'article p. 102).

4.3.2 Résultats et discussion

Si les performances dans la tâche contrôle étaient meilleure dans cette expérience que dans l'expérience 1 (cet effet est probablement dû à la longueur des sons dans cette expérience : 300 ms dans ce test contre environ 50 ms pour le test 1), les conditions faisant intervenir le rehaussement de fréquence et d'intensité ont été mieux réussies que les conditions sans rehaussement ($t(4) = 4,21$; $P = 0.003$ pour le rehaussement de fréquence, $t(4) = 5,22$; $P > 0,001$). Aucune différence n'a été observée lors de la comparaison des performances dans les conditions rehaussement de fréquence et d'intensité ($t(4) = 1,01$; $P = 0,34$).

Ainsi, l'introduction du bruit entre le précurseur et le test n'a pas permis d'empêcher le rehaussement, qu'il soit d'intensité ou de fréquence. Pourtant, l'intensité du bruit a été fixée de manière à masquer complètement les composants du précurseur. Les résultats de cette expérience ne confirment pas les hypothèses selon lesquelles le rehaussement serait entièrement basé sur l'adaptation ou l'adaptation de l'inhibition. De plus, les résultats des expériences 1 et 2 ne nous permettent pas d'appuyer l'hypothèse selon laquelle le rehaussement de fréquence et d'intensité sont dus à des mécanismes

différents, dans la mesure où les performances à ces deux modalités sont similaires.

Une troisième expérience a donc été conçue, en utilisant un protocole légèrement différent dans le mode de présentation des accords.

4.4 Le mode de présentation (ipsi ou controlatéral) affecte-t-il le rehaussement d'intensité et le rehaussement de fréquence de la même façon ?

4.4.1 Objectifs et méthode

L'objectif de l'expérience 3 était de déterminer si le rehaussement de fréquence et d'intensité étaient affectés de la même façon quand le précurseur et le test étaient présentés aux oreilles opposées. Pour cela l'expérience était constituée de 5 modalités :

- Une condition contrôle dans laquelle le précurseur et le test étaient présentés à la même oreille
- Une condition avec rehaussement de fréquence dans laquelle précurseur et test étaient présentés à la même oreille (ipsilatéral),
- Une condition avec rehaussement de fréquence dans laquelle le précurseur et le test étaient présentés dans les oreilles opposées (contralatéral)
- Une condition avec rehaussement d'intensité dans laquelle précurseur et test étaient présentés à la même oreille (ipsilatéral)

- Une condition avec rehaussement d'intensité dans laquelle précurseur et test étaient présentés dans les oreilles opposées (contralatéral)

Notons que chacune des 5 conditions était divisée en 2 sous conditions : une sous condition dans laquelle le précurseur était présenté dans l'oreille gauche, et l'autre dans laquelle le précurseur était présenté dans l'oreille droite. Les participants réalisaient toutes les conditions dans un ordre aléatoire.

Comme dans l'expérience 1, les paramètres (différence d'intensité entre le composant cible du précurseur et celui du test pour le rehaussement d'intensité, et la durée des accords pour le rehaussement de fréquence) ont été ajustés (en ipsilatéral) de façon à ce que les performances (exprimées en d') soient similaires entre le rehaussement de fréquence et d'intensité (pour plus de détails sur la méthode, se référer à l'article p. 102).

4.4.2 Résultats et discussion

Les conditions avec rehaussement ont été mieux réussies que la condition contrôle ($t(5) = 12$; $P = 0.000$ pour le rehaussement d'intensité, $t(5) = 10,2$; $P = 0.000$ pour le rehaussement de fréquence) (Figure 4.5).

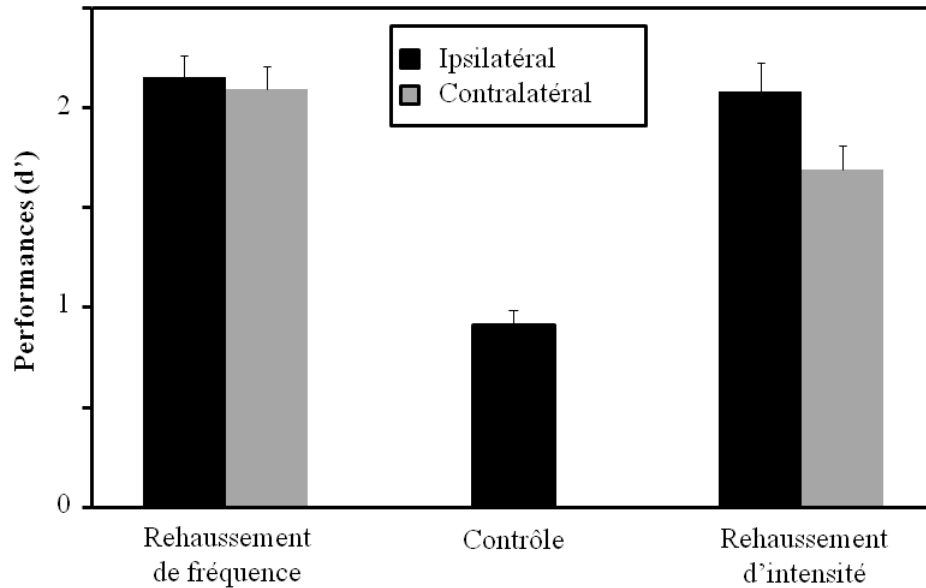


FIGURE 4.5 – Performances moyennes (exprimées en d' , avec erreur-type), selon le type de rehaussement, et le mode de présentation (Ipsilatéral ou Contralatéral).

Une ANOVA à mesures répétées à deux facteurs [mode de présentation $\times$ type de changement] a été calculée. L'effet principal du mode de présentation s'est révélé significatif ($F(1,5) = 7,58 : P = 0,04$), ainsi que l'interaction [mode de présentation $\times$ type de changement] ($F(1,5) = 7,18 : P = 0,04$). La présentation des précurseurs et test aux oreilles opposées a dégradé davantage les performances en rehaussement d'intensité (Figure 4.6).

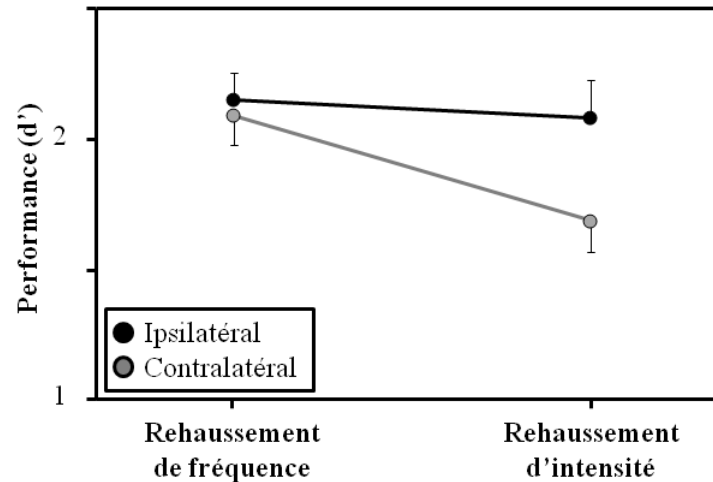


FIGURE 4.6 – Interaction entre le type de rehaussement et le mode de présentation (Ipsilatéral en noir, Contralatéral en gris). La présentation dans les oreilles opposées du précurseur et du test a dégradé davantage les performances en rehaussement d'intensité.

Pour résumer : Les trois expériences avaient pour objectif de déterminer si le rehaussement d'intensité et le rehaussement de fréquence sont sous tendus par les mêmes mécanismes. Les expériences 1 et 2 n'ont pas permis de distinguer deux processus qui seraient à l'origine des deux types de rehaussement. L'expérience 3, en revanche, a permis de dissocier les mécanismes à la base du rehaussement d'intensité et du rehaussement de fréquence, suggérant que ce dernier est sous tendu par les FSD.

4.5 Discussion

Comme cela a été mentionné précédemment, il est communément admis que l'adaptation neuronale est à l'origine du rehaussement d'intensité. Pourtant les résultats des études 1 et 2 n'ont pas montré l'affaiblissement du rehaussement prédit par cette hypothèse lors de la présentation de bruit rose entre les accords. Ce résultat ne signifie pas pour autant que le rehaussement ne provient pas de l'adaptation neuronale, mais suggère que cette adaptation se situerait à un niveau très central, à un niveau où des neurones s'activeraient pour des sons purs résolus au niveau périphérique, mais seraient insensibles au bruit. A cet endroit-là, les sons monauraux présentés dans l'oreille droite ou l'oreille gauche produiraient une réponse similaire. Cela expliquerait la forme de rehaussement d'intensité produite par une présentation du précurseur à une oreille, et du test à l'autre oreille que nous avons observée dans l'expérience 3.

L'objectif principal de cette étude était de déterminer si le rehaussement d'intensité et de fréquence étaient basés sur des mécanismes identiques. Les résultats de l'expérience 3 suggèrent que ce n'est pas le cas, dans la mesure où le rehaussement de fréquence était moins affecté par la présentation dans les oreilles opposées que le rehaussement d'intensité. Le fait selon lequel le rehaussement de fréquence n'est pas affecté par une présentation du précurseur et du test dans les oreilles opposées est prévisible si l'on envisage l'hypothèse des FSD comme étant à l'origine de ce type de rehaussement.

Dans une étude très récente, Demany et al. (2013) fournissent des arguments supplémentaires pour étayer l'idée selon laquelle le rehaussement de fréquence ne peut pas être complètement expliqué par les mêmes mécanismes que le rehaussement d'intensité. Dans cette expérience ayant pour objectif de déterminer si le rehaussement d'intensité et le rehaussement de fréquence étaient affectés de la même façon par une atténuation relative du précurseur par rapport au test, les auteurs ont présenté aux participants des séquences sonores composées d'un accord précurseur, d'un accord test et d'un son pur. Le précurseur était composé de 5 sons purs. Le précurseur devait rehausser un des composants du test (le composant cible). Dans la condition de rehaussement d'intensité, un des composants de l'accord (en dehors des composants extrêmes) était moins intense que les autres composants. Dans la condition de rehaussement de fréquence, les composants de l'accord n'étaient pas répartis également en fréquence : la fréquence de l'un d'eux était inférieure d'un demi ton, relativement à une répartition régulière. Le test était lui-même composé de 5 sons purs d'intensité égale. La fréquence du son pur était d'une fréquence identique ou intermédiaire à celle de deux composants du test. Les participants devaient déterminer si le son pur était dans le test ou non. Dans chacune des conditions (rehaussement d'intensité, de fréquence, pas de rehaussement), les composants non cible du précurseur et les composants du test pouvaient prendre plusieurs intensités : 70 et 70 dB, 60 et 70 dB, et 60 et 60 dB, respectivement pour le précurseur et le test.

L'analyse des résultats a montré que l'excitation produite par des variations de fréquence entraînant un fort effet de rehaussement n'est pas suffisante pour entraîner un fort rehaussement d'intensité. De plus, la sensibilité de l'effet du rehaussement à une atténuation du précurseur relativement au test est plus basse pour le rehaussement de fréquence que pour le rehaussement d'intensité. Ces résultats suggèrent que le rehaussement de fréquence et le rehaussement d'intensité ne sont pas régis par les mêmes mécanismes. Les FSD pourraient être à l'origine du rehaussement de fréquence.

Carcagno et al. (2011) ont étudié les relations entre les FSD et le système binaural, en tentant de réponse à la question suivante : les FSD détectent-ils des variations de fréquence entre des sons présentés aux oreilles opposées ? Si les FSD se situent en dessous de l'olive médiale supérieure (niveau des voies auditives où les premiers traitements binauraux se produisent, Goldberg et al. 1969), ils ne devraient pas détecter de variation de fréquence entre des sons présentés aux oreilles opposées. Pour cela, les auteurs ont présenté aux participants des séquences de sons composées d'un accord inharmonique de 5 sons purs synchrones de 300 ms, de 500 ms de silence, et d'un son pur de 300 ms. L'expérience était composée de deux tâches : une tâche «présent/absent», où la fréquence du son pur était soit celle d'un des composants de l'accord, soit une fréquence intermédiaire entre deux composants adjacents. Les participants devaient indiquer si le son pur était présent ou absent de l'accord. Une deuxième tâche «baisse/monte» faisait également partie du protocole expérimental. Ici, la fréquence du son pur était soit 100 cents au dessus,

soit 100 cents au dessous de celle d'un des composants de l'accord. Les participants devaient indiquer si le son pur était plus haut ou plus bas que le composant de l'accord. Dans la tâche «présent/absent», l'accord et le son étaient présentés diotiquement (c'est-à-dire que les deux oreilles reçoivent le même stimulus). Dans la tâche «monte/baisse», l'accord et le son étaient présentés monoralement, soit dans la même oreille, soit dans les oreilles opposées. Lorsque l'accord ou le son étaient présentés à une oreille, un bruit rose était présenté à l'autre oreille (de façon à ramener l'image du son vers le centre de la tête). Les auteurs ont observé que les performances étaient très bonnes dans les deux conditions de la tâche «baisse/monte». L'analyse des résultats a toutefois montré une baisse significative des performances lorsque les sons étaient présentés contralatéralement. Les performances de la tâche «présent/absent» se sont révélées être inférieures à celles de la tâche «baisse/monte», quelle que soit la condition.

Cette étude, comme celles de Demany et al. (2005), Demany et al. (2009) et Demany et al. (2011) a permis de montrer que la direction d'un changement de fréquence pouvait être déterminée, alors même que le changement de fréquence en question n'est pas détecté, apportant une preuve indéniable de l'existence des FSD dans le système auditif. Ces résultats montrent également que les FSD détectent les variations de fréquence entre des sons présentés contralatéralement. Une diminution des performances avait été observée pour la condition où les sons étaient présentés contralatéralement, toutefois, cet effet ne se retrouve pas chez tous les participants. Il est ainsi

probable que la présentation contralatérale ait eu un effet distracteur chez certains participants. Ainsi, Carcagno et al. (2011) ont confirmé que les FSD permettaient de détecter des variations de fréquences même lorsque deux sons étaient présentés contralatralement. Cela suggère que leur localisation est plutôt centrale que périphérique.

Pour résumer : plusieurs études ont montré que des mécanismes différents étaient à la base du rehaussement d'intensité et du rehaussement de fréquence. Le rehaussement d'intensité serait induit par un phénomène d'adaptation neuronale, quand les FSD pourraient être à l'origine du rehaussement de fréquence. Il semble également clair que les mécanismes sous tendant le rehaussement, qu'il soit de fréquence ou d'intensité, sont des mécanismes plutôt centraux.

4.6 Article publié dans Journal of American Society of America (2011)

Enhancing a tone by shifting its frequency or intensity

Mayalen Erviti, Catherine Semal, and Laurent Demany^{a)}

*Institut de Neurosciences Cognitives et Intégratives d'Aquitaine (UMR CNRS 5287), BP 63,
Université de Bordeaux, 146 rue Leo Saignat, F-33076 Bordeaux, France*

(Received 30 November 2010; revised 18 April 2011; accepted 18 April 2011)

When a test sound consisting of pure tones with equal intensities is preceded by a precursor sound identical to the test sound except for a reduction in the intensity of one tone, an auditory “enhancement” phenomenon occurs: In the test sound, the tone which was previously softer stands out perceptually. Here, enhancement was investigated using inharmonic sounds made up of five pure tones well resolved in the auditory periphery. It was found that enhancement can be elicited not only by increases in intensity but also by shifts in frequency. In both cases, when the precursor and test sounds are separated by a 500-ms delay, inserting a burst of pink noise during the delay has little effect on enhancement. Presenting the precursor and test sounds to opposite ears rather than to the same ear significantly reduces the enhancement resulting from increases in intensity, but not the enhancement resulting from shifts in frequency. This difference suggests that the mechanisms of enhancement are not identical for the two types of change. For frequency shifts, enhancement may be partly based on the existence of automatic “frequency-shift detectors” [Demany and Ramos, *J. Acoust. Soc. Am.* **117**, 833–841 (2005)]. © 2011 Acoustical Society of America.
[DOI: 10.1121/1.3589257]

PACS number(s): 43.66.Mk, 43.66.Fe [EB]

Pages: 3837–3845

I. INTRODUCTION

The auditory system is endowed with remarkable capacities for *change* detection, as shown by numerous psychophysical and physiological studies. It is well known, for instance, that the perceptual detection threshold of a brief tone burst added to a longer, wideband noise burst is better when the tone occurs some time after the noise onset (so that the tone occurrence constitutes a change) than when the tone onset coincides with the noise onset. The mechanisms of this so-called “overshoot” effect are still not completely understood, but plausible factors have been identified (see, e.g., Strickland, 2004 and Scharf *et al.*, 2008). The present paper is concerned with a related but somewhat different form of change detection. Consider a sound sequence in which a sum of pure tones or a noise burst is followed by a repetition of the same sound with a spectrally local intensity increment. The listener will tend to perceive the second sound as a sum of two sounds: on one hand a repetition of the first sound and on the other hand a separate tone in the frequency region where the intensity increment took place. The separate-tone percept may be elicited even if the second sound (called hereafter the “test sound”) has in fact a flat spectral profile, while the first sound (the “precursor”) has a spectral notch. An important difference between this “enhancement” effect and the previously described overshoot effect is that, in the enhancement effect, the detection of a change is not reducible to the detection of a transient since all the spectral components of the test sound are gated on synchronously (see in this respect Macmillan, 1971, 1973; Bacon and Moore, 1987; Hafer *et al.*, 1998; Gallun, 2003, Chap. 3).¹

One potential explanation of enhancement is neural adaptation (Viemeister, 1980; Summerfield *et al.*, 1987; Palmer *et al.*, 1995; Serman *et al.*, 2008). The rationale is straightforward. Consider the case of a test sound consisting of pure tones with equal intensities and preceded by a precursor with the same power spectrum, except for a reduction in the intensity of one tone (the target of the enhancement). In some tonotopically organized array of neurons, the response to the test sound may show a local peak corresponding to the frequency of the target tone because neural adaptation is expected to be weaker in the neurons responding to the target tone than in the other neurons. The local peak in excitation is then liable to give rise to the perception of a separate tone. A variant of the adaptation hypothesis is the “adaptation of suppression” hypothesis proposed by Viemeister and Bacon (1982). According to these authors, the origin of enhancement is not so much a weakening, by the precursor sound, of the nontarget components of the test sound, but rather a weakening, by the precursor sound, of the nontarget components’ ability to suppress (or inhibit) the target tone. In support of this hypothesis, the psychophysical studies of Viemeister and Bacon (1982) and Byrne *et al.* (2011) showed that enhancement could manifest itself as an increased ability of the test sound to mask a subsequent and brief tone burst at the target tone frequency. Physiological data supporting the same hypothesis were recently reported by Nelson and Young (2010).

It has been found in several studies that enhancement does not occur when the precursor and test sounds are presented to opposite ears (Viemeister, 1980; Summerfield *et al.*, 1984, 1987; Summerfield and Assmann, 1989; Carlyon, 1989; Serman *et al.*, 2008). This might suggest that the main physiological source of enhancement is *peripheral* neural adaptation. However, as pointed out by Kidd and

^{a)} Author to whom correspondence should be addressed. Electronic mail: laurent.demany@u-bordeaux2.fr

Wright (1994), an alternative interpretation is that the neural adaptation underlying enhancement takes place centrally and is not only frequency-selective but also selective to sound localization by the binaural system. This interpretation seems *a priori* reasonable since stimulus-specific neural adaptation can occur beyond the convergence of the two monaural pathways (see, e.g., Ulanovsky *et al.*, 2003). In line with the idea that enhancement originates, at least in part, from central adaptation, Serman *et al.* (2008) found that enhancement is stronger when the precursor and test sounds are lateralized by means of the same interaural time difference (ITD) than when they have opposite ITDs. However, this might stem from factors other than central adaptation. In subsequent experiments, Serman *et al.* wondered whether a tone presented among other tones can be made to pop out (and thus can be enhanced) due solely to a change in the ITD of this tone, without any increase in intensity. They reasoned that this form of enhancement would certainly have a central origin, and would provide good psychophysical evidence for central adaptation. But they failed to obtain strong effects of that type.

Except for the study by Serman *et al.*, and another study concerning the possibility to produce enhancement on the sole basis of an ITD change (Kubovy and Howard, 1976), it seems that all the past investigations of enhancement have explored, more specifically, enhancement phenomena resulting from an increase in intensity. Yet, we noted informally that enhancement can also be produced by changes in frequency. When the precursor and test sounds are made up of pure tones sufficiently spaced in frequency to be resolved in the cochlea, and that the two sounds differ from each other only by a slight frequency shift in a single tone, this tone stands out in the test sound. Of course, this is not very surprising per se. The frequency shift is expected to increase the excitation level of some frequency-selective neurons. Thus, the enhancement resulting from frequency shifts (we shall subsequently call it “frequency enhancement”) may have exactly the same sources as the enhancement resulting from increases in intensity (hereafter called “intensity enhancement”). However, this might also not be the case. Recent psychophysical experiments, which will be reviewed later in this paper, suggest that the auditory system contains automatic “frequency-shift detectors (FSDs)”. It might be that these detectors are instrumental in frequency enhancement, while intensity enhancement is based on different mechanisms. This is the hypothesis tested in the three experiments reported here.

In all three experiments, we used precursor and test sounds consisting of inharmonic chords of pure tones resolved in the auditory periphery. In experiments 1 and 2, the precursor and test chords presented on a given trial were separated either by silence only or by a burst of pink noise, and we assessed the effect of the noise on intensity enhancement and on frequency enhancement. We reasoned that if intensity enhancement were mainly based on neural adaptation, the noise could be deleterious to this form of enhancement since it should produce *nonselective* adaptation of frequency-selective neurons. On the other hand, under the assumption that frequency enhancement is mainly an accom-

plishment of the FSDs, previous results which will be described below (Demany and Ramos, 2007; Demany *et al.*, 2011) led to the prediction that the noise would have little effect on this form of enhancement. In experiment 3, the precursor and test chords used on a given trial were presented either to the same ear or to opposite ears. The literature suggested that, in the latter case, intensity enhancement would not be observed. On the other hand, under the assumption that the FSDs are instrumental in frequency enhancement, it could be expected that frequency enhancement would be barely reduced when the precursor and test chords are presented to opposite ears rather than to the same ear (Demany and Ramos, 2007; Carcagno *et al.*, 2011).

II. EXPERIMENT I

A. Method

1. Overview

The aim of experiment 1 was to determine if frequency enhancement and intensity enhancement are equally affected by the insertion of a burst of pink noise between the precursor and test sounds. To this end, enhancement was measured in six conditions. In three conditions (“*Baseline-No noise*,” “*Intens-No noise*,” and “*Freq-No noise*”), the precursor and test sounds were separated by a silent inter-stimulus interval (ISI). The three remaining conditions (“*Baseline-Noise*,” “*Intens-Noise*,” and “*Freq-Noise*”) were identical except that here a noise burst was inserted during the ISI. The test sounds used in all conditions were similar; they consisted of inharmonic chords of pure tones with a flat spectral profile (further details are provided in the next section, II A 2). In the two *Baseline* conditions, the precursor and test chords used on a given trial were always identical, so that no enhancement could occur. In the *Intens* conditions, the precursor chord preceding a given test chord differed from it by a reduction in the intensity of one tone. The *Freq* conditions differed from the *Intens* conditions only in that the shift in intensity was replaced by a shift in frequency. In the *Freq* conditions, therefore, both the precursor and test chords consisted of equal-intensity tones.

Enhancement was assessed by means of a “present/absent” task (Demany and Ramos, 2005): On each trial, the sequence of chords was followed by a probe tone (see Sec. II A 2) and the subject had to indicate if this tone was present in the test chord or absent from it. One could reasonably assume that performance in this task would be a monotonic function of the magnitude of enhancement.

Since our aim was to compare the effects of noise on intensity enhancement and frequency enhancement, the experiment proper was preceded by parameter adjustments intended to obtain a similar performance level (corresponding approximately to $d' = 2.5$) in the *Intens-No noise* and *Freq-No noise* conditions. We describe in Secs. II A 4 and II A 5 the two corresponding preliminary steps.

2. Stimuli

Each test chord consisted of five synchronously gated pure tones with the same nominal sound pressure level

(65 dB). The frequencies of these five tones were renewed randomly from trial to trial. On each trial, the frequency content of the test chord was determined as follows. First, the four frequency intervals separating the five tones forming the chord were chosen randomly, independently of each other, in a logarithmically scaled range of frequency intervals extending from 6 to 10 semitones. Then, the chord as a whole was randomly positioned within a logarithmically scaled frequency range extending from 200 to 3200 Hz.

In the *Freq* conditions as well as the *Intens* conditions, the precursor chord preceding a given test chord differed from it with respect to a single tone, which was the target of enhancement in the test chord. This tone could be equiprobably the second, third, or fourth component of the chord (i.e., any of the three “inner” components). In the *Freq* conditions, the frequency shift taking place from the precursor chord to the test chord was always an upward shift of one semitone (i.e., 1/12 octave). In the *Intens* conditions, the magnitude of the increase in intensity was subject-dependent (see Sec. II A 5).

On “present” trials, the probe tone following the sequence of chords was identical to the target of enhancement in the test chord for the *Intens* and *Freq* conditions, and could be any of the three inner components of the chord in the *Baseline* conditions. On “absent” trials, the frequency of the probe tone was the geometric mean of the frequencies of two adjacent components of the test chord; a random choice was made between the four possible options.

In the three *Noise* conditions, the presented noise bursts consisted of pink noise (40–20 000 Hz) at a level of 69 dB (A scale). This level was such that the noise bursts were approximately matched in loudness to the chords.

3. Temporal structure of the trials

Figure 1 depicts two possible trials, one in the *Freq-No noise* condition (a) and the other in the *Freq-Noise* condition (b). In the three *No noise* condition, five successive stimuli were presented on each trial. These five stimuli were: (1) the precursor chord; (2) the test chord; (3) a repetition of the precursor chord; (4) a repetition of the test chord; (5) the probe tone. These five stimuli were gated on and off with 10-ms raised-cosine amplitude ramps and had the same duration, D . D was fixed across all conditions for a given subject, but it varied across subjects, as specified in the following section (II A 4). The first four stimuli were separated by ISIs of 500 ms, and there was a 0-ms ISI between the two final stimuli.

In the three *Noise* conditions, the sequence of stimuli that we just described was again presented, with exactly the same timing, but in addition a noise burst was also presented in the center of the 500-ms ISIs separating a precursor chord from the following test chord, or vice versa. Thus, three noise bursts were produced on each trial. They had the same duration (D) as the other stimuli, and were also gated on and off with 10-ms raised-cosine amplitude ramps.

After the presentation of the probe tone, the subject gave his or her response (“present” or “absent”) by making a mouse-click on one of two virtual buttons. Visual feedback

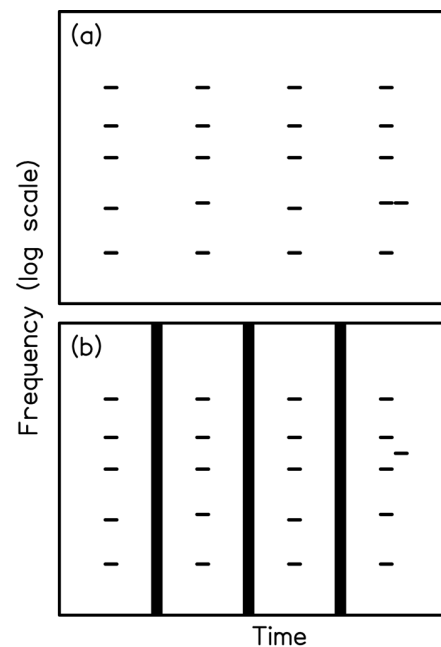


FIG. 1. Two possible trials in experiment 1: one trial in the *Freq-No noise* condition (a) and one trial in the *Freq-Noise* condition (b). Each horizontal segment represents a pure tone and the filled rectangular areas represent noise bursts. The pure tones form four successive chords. The first and third chords are the “precursor” chord and the second and fourth chords are the “test” chord. Note that in each panel the only difference between the precursor and test chords is that the second component tone of the test chord is slightly higher in frequency than the second component tone of the precursor chord. This changing tone is the target tone for the trials depicted here. In each panel, the rightmost horizontal segment represents the probe tone. The correct response is “present” for (a) and “absent” for (b). In the experiment, the duration of the tones and noise bursts varied across subjects, but this duration was always much smaller than the 500-ms time interval separating the successive chords or noise bursts.

was immediately provided, by means of a green light if the response was correct and a red light otherwise.

4. Preliminary step 1: Determination of duration D

Enhancement is stronger when the precursor stimulus is long than when it is very short, all other things being equal (Viemeister, 1980). Before the experiment proper, we first estimated the value that D should take in order to obtain, for condition *Freq-No noise*, a d' value of about 2.5. This was done subject by subject. The estimation obtained for a given subject was subsequently used as a constant in all conditions, for this subject. D varied across subjects between 30 and 70 ms; its mean value was 58 ms.

5. Preliminary step 2: Determination of the intensity shift ΔI

In the *Freq* conditions, as mentioned above, the tone which changed from the precursor chord to the test chord always increased in frequency by 1 semitone. For the *Intens* conditions, we wished to use a subject-dependent intensity shift (ΔI) adjusted in order to obtain a similar performance level ($d' \cong 2.5$) in conditions *Intens-No noise* and *Freq-No noise*. For each subject, the appropriate value of ΔI was estimated before the experiment proper, following the

determination of D . The ΔI values arrived at ranged from 9 to 30 dB across subjects; their mean was 16.6 dB.

6. Procedure

All stimuli were presented diotically, via Sennheiser HD265 headphones, in a sound-attenuating booth (Gisol, Bordeaux). Trials were organized in blocks of 50, during which the condition was fixed. Within each block, a trial started about 700 ms after the response given on the previous trial. In a given session of the experiment proper, six blocks of trials were run: one block for each of the six conditions. These six blocks were randomly ordered. The experiment proper comprised eight sessions, so that overall each subject performed 400 trials in each condition.

7. Subjects

Five listeners, including authors ME and LD, were tested. Four of these listeners were students in their twenties. The fifth listener, LD, was aged 56. All listeners had normal audiometric thresholds (≤ 20 dB hearing level) from 125 Hz up to at least 4 kHz.

B. Results and discussion

Performance was measured in terms of the sensitivity index d' . Since the five subjects behaved similarly, their results are averaged in Fig. 2. As expected due to the preliminary adjustments of D and ΔI , d' was close to 2.5 in the *Freq-No noise* condition and the *Intens-No noise* condition. As also expected, performance was much better in these two conditions than in condition *Baseline-No noise*, which provides evidence for both frequency enhancement and intensity enhancement. The main result is that performance was very similar with and without noise. The noise bursts failed to reduce substantially intensity enhancement or frequency enhancement. A repeated-measures analysis of variance

[Subject $\times$ Change modality (intensity, frequency, or no change) $\times$ Noise interference (yes or no)] confirmed that Change modality had a significant main effect [$F(2, 8) = 88.2, P < 10^{-4}$], whereas this was not the case for Noise interference [$F(1, 4) = 2.55, P = 0.19$]. There was no significant interaction between these two factors [$F(2, 8) < 1$].

Based on the assumption that intensity enhancement entirely originates from neural adaptation, we had predicted that performance would be significantly poorer in the *Intens-Noise* condition than in the *Intens-No noise* condition. This prediction was not fulfilled [$t(4) = 1.08, P = 0.17$, one-tailed test]. One conceivable explanation is that although the noise bursts were even more intense than the precursor (and test) chords, their intensity was still insufficient to reduce significantly the selectivity of the adaptation produced by the precursor chords. Under the adaptation hypothesis, actually, the overall intensity of the noise burst following a given precursor chord was not important in itself: What really mattered was the noise intensity at the output of the auditory filters previously activated by the precursor chord. This “effective” intensity of a noise burst was of course smaller than its overall intensity.

We performed experiment 2 in order to determine if the enhancement of one component of a test chord by a precursor chord can be cancelled by the insertion, between the two chords, of a burst of pink noise adjusted in intensity so that this noise would mask almost completely the components of the precursor if these components were presented *within* the noise.

III. EXPERIMENT II

A. Method

Experiment 2 was similar to experiment 1, but differed from it with respect to the following points. First, the previously run *No noise* conditions were now omitted; a noise burst was always inserted between a precursor chord and the following test chord. Thus, there were only three experimental conditions, labeled as “*Baseline*,” “*Intens*,” and “*Freq*.” Second, there was only one presentation of the precursor and test chords on each trial (rather than two presentations, as before); but again, these two chords were separated by a 500-ms ISI and the probe tone followed immediately the test chord. Third, all stimuli now had a duration of 300 ms. Thus, the noise bursts were separated from the precursor and test chords by 100-ms ISIs. Fourth, ΔI was essentially infinite: On each trial run in the *Intens* condition, the target of enhancement was completely undetectable within the precursor chord. Finally, and most importantly, we used test chords and noise bursts that differed from those used in experiment 1 with respect to intensity (but only in this respect). Each test chord component was now presented at a nominal sound pressure level of 56 dB, and the noise bursts now had an overall level of 72 dB (A scale). These two parameters were such that if a test chord component had been presented synchronously with a noise burst, it would have been barely detectable.²

The subjects were the same as those of experiment 1, and again 400 trials per condition were performed by each

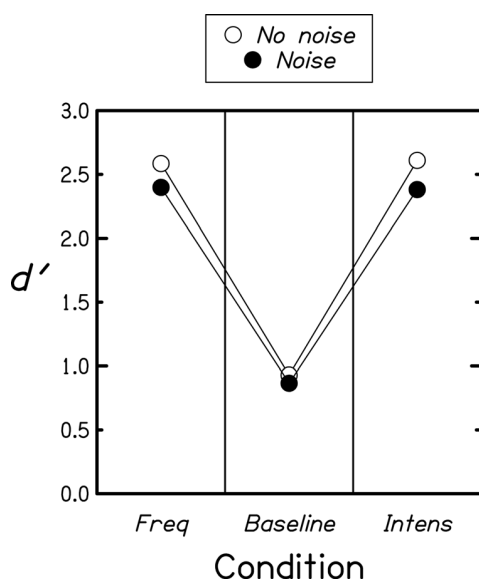


FIG. 2. Mean d' values obtained in the six conditions of experiment 1. Each data point represents the outcome of 2000 trials (400 trials for five subjects).

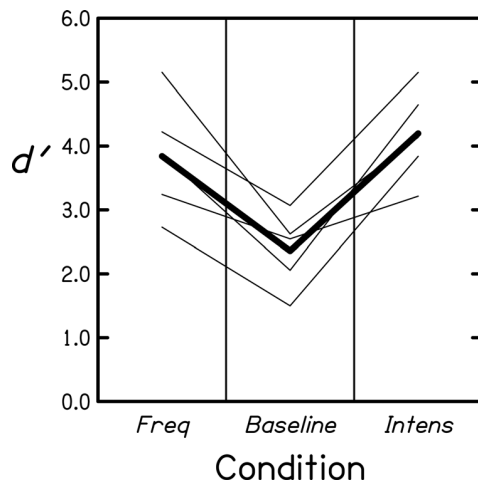


FIG. 3. Results obtained in the three conditions of experiment 2. Thin lines connect the individual values of d' (400 trials per condition and subject). Thick lines connect the means of these values.

subject in the experiment proper (which was preceded by a few blocks of practice trials).

B. Results and discussion

Figure 3 displays the results obtained in each subject (thin lines) as well as the means across subjects (thick lines). *Baseline* performance was better than in experiment 1, presumably because the chords used in the current experiment had a much longer duration. However, performance was even better, by far, in the *Freq* condition [$t(4)=4.21$, $P=0.003$] and the *Intens* condition [$t(4)=5.22$, $P<0.001$]. There was no significant difference between the d' values obtained in conditions *Intens* and *Freq* [$t(4)=1.01$, $P=0.34$], although ΔI was essentially infinite while the frequency shifts had a magnitude of only one semitone.

Thus, as in experiment 1, the noise bursts failed to prevent frequency or intensity enhancement, even though here the noise was intense enough to mask almost completely the chord components, which suggests that the auditory filters activated by the precursor chords were not activated less strongly by the noise. Overall, the results of experiments 1 and 2 do not support the hypothesis that frequency enhancement and intensity enhancement are based on different mechanisms, but these results also seem to be at odds with the idea that enhancement entirely originates from adaptation (or adaptation of suppression).

In order to account for our results with an adaptation model, one could assume that, in some tonotopically organized neural map, the noise reduced the response to each of the test chord's components by subtracting to the "normal" (i.e., nonadapted) response (R) a constant quantity, a . Suppose that, in consequence of the precursor presentation in the *Intens* and *Freq* conditions, the response to each of the non-target components of the test chord was reduced by b while the response to the target component was reduced by c , with $c < b$. If the adaptation effects of the precursor and the noise were additive, the noise did not alter the selectivity of the adaptation produced by the

precursor since $(b + a) - (c + a) = b - c$. However, there is no special reason to model the effect of adaptation as a subtraction rather than, e.g., a division. When a , b , and c are reinterpreted as dividing factors rather than subtracted values, the noise reduces the selectivity of adaptation since $R/(ca) - R/(ba) = (R/c - R/b)/a$. Note that the two models that we just presented are deterministic. It would be more realistic to assume, in line with signal detection theory (Green and Swets, 1974, Chap. 3), that the adaptation produced by the noise varied unpredictably across frequency due to random fluctuations in the state of the auditory system. Under this assumption, the noise should have disrupted to some extent the selectivity of the adaptation produced by the precursor, even in the framework of an additive model such as the first of the two models presented above. If a is a frequency-dependent random variable rather than a fixed quantity, then, on a majority of trials, the value taken by this variable will be larger in the frequency region of the target tone than in the frequency region of some other tone, and this will weaken the enhancement of the target tone.

IV. EXPERIMENT III

A. Method

The goal of experiment 3 was to determine if frequency enhancement and intensity enhancement are equally affected when the precursor and test stimuli are presented to opposite ears rather than to the same ear. To this end, we used a method which was, *mutatis mutandis*, very similar to that used in experiment 1. Subjects again had to perform a present/absent task. Trials had the same temporal structure as in experiment 1, except that now the ISI separating successive chords was always silent and had a duration of 600 ms rather than 500 ms. The test chords were chosen exactly as in experiment 1, and each of their components again had a nominal sound pressure level of 65 dB. However, every chord was now presented monaurally, and combined with a synchronous burst of pink noise presented to the opposite ear at 69 dB (A). Thus, when the precursor and test chords were presented to opposite ears, the noise was presented first in one ear and second in the other ear. The noise served to minimize the possibility of interaural cross-talk, and also had another advantage that we shall point out later. In a *Baseline* condition, the precursor and test chords used on a given trial were identical and presented to the same ear. There were four other conditions, labeled as "*Freq-Ipsi*," "*Freq-Contra*," "*Intens-Ipsi*," and "*Intens-Contra*." In these labels, "*Ipsi*" means that the precursor and test chords were at the same ear while "*Contra*" refers to an opposite-ear presentation; "*Freq*" and "*Intens*" have the same meaning as in experiment 1.

Again, the frequency shifts were always upward shifts of 1 semitone while the magnitude of the intensity shifts, ΔI , varied from subject to subject. A first preliminary step in condition *Freq-Ipsi* served to adjust stimulus duration (D) in order to obtain a d' of about 2.0 in that condition. Then, in a second preliminary step, ΔI was adjusted in order to obtain also a d' of about 2.0 in condition *Intens-Ipsi*. The adopted

values of D ranged from 40 to 70 ms across subjects; their mean was 55 ms. The adopted values of ΔI ranged from 8 to 18 dB and their mean was 12.8 dB.

In the experiment proper, each of the five conditions was divided in two sub-conditions: one sub-condition in which the test chord was presented to the left ear and another sub-condition in which the test chord was presented to the right ear. During an experimental session, each of the ten sub-conditions was run in one block of 50 trials; the ten blocks were randomly ordered. The experiment proper comprised four sessions, so that overall each subject performed 400 trials in each condition.

Six listeners with normal hearing were tested. Four of them (including authors ME and LD) had previously participated as subjects in experiments 1 and 2. The two new subjects were students in their twenties.

B. Results and discussion

The results are displayed in Fig. 4. As expected, performance was similar in conditions *Freq-Ipsi* and *Intens-Ipsi*, and much better in these two conditions than in the *Baseline* condition [*Baseline* vs *Freq-Ipsi*: $t(5) = 12.0$, $P < 10^{-4}$; *Baseline* vs *Intens-Ipsi*: $t(5) = 10.2$, $P < 10^{-4}$]. A repeated-measures analysis of variance [Subject $\times$ Ear modality (ipsi or contra) $\times$ Type of change (intensity or frequency)] was conducted on the overall data, excluding the *Baseline* condition since in this condition ear modality was fixed. The analysis of variance revealed a significant main effect of Ear modality [$F(1, 5) = 7.58$, $P = 0.04$] and most importantly a significant interaction between Ear modality and Type of change [$F(1, 5) = 7.18$, $P = 0.04$].³ The interaction reflects the fact that presenting the precursor and test chords to opposite ears rather to the same ear was more deleterious for intensity enhancement than for frequency enhancement. In the former case, d' decreased by 18.8%, on average; this effect is statistically significant [$t(5) = 5.63$, $P = 0.002$]. In the latter case, d' decreased by only 1.9%, on average, and this trend is not statistically significant [$t(5) < 1$].

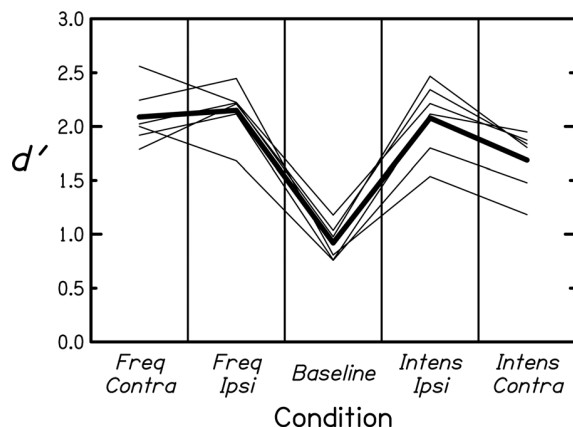


FIG. 4. Results obtained in the five conditions of experiment 3. Thin lines connect the individual values of d' (400 trials per condition and subject). Thick lines connect the means of these values.

The interaction between Ear modality and Type of change, which is the main outcome of this experiment, will be discussed in the next section. Here, let us focus on a different and unexpected aspect of the data. In condition *Intens-Contra*, performance was poorer than in condition *Intens-Ipsi*, but nonetheless markedly and significantly better than in the *Baseline* condition [$t(5) = 7.19$, $P < 0.001$]. Thus, intensity enhancement was observed even when the precursor and test chords were presented to opposite ears. This is a surprising finding since the literature consistently suggests that intensity enhancement is impossible under such circumstances (Viemeister, 1980; Summerfield and Assmann, 1989; Summerfield *et al.*, 1984, 1987; Carlyon, 1989; Serman *et al.*, 2008).

One of the possible reasons why we were able to observe “dichotic intensity enhancement” in the current experiment is that whenever a chord was presented, a burst of noise was simultaneously presented to the opposite ear. This noise attracted the spatial image of the chord toward the center of the head, a perceptual effect named “contralateral induction” by Warren and Bashford (1976). As a result, when a precursor chord was followed by a test chord in the opposite ear, the corresponding perceived change in spatial position was smaller than it would have been in the absence of noise. That might have made the task easier. Consistent with this hypothesis, it has been reported several times in the literature that the perceptual processing of a monaural sound or sound sequence can be improved by the contralateral and simultaneous presentation of a different sound or sound sequence (see, e.g., Deutsch, 1979; Kidd *et al.*, 2005).

However, our experiment differed in many other ways from those in which no evidence for dichotic intensity enhancement has been found. In the studies of Viemeister (1980) and Carlyon (1989), enhancement was assessed in a simultaneous-masking paradigm where, on each trial, listeners had to discriminate between two stimuli, a fixed masker stimulus without the target tone and a stimulus resulting from the addition of the target tone (at a variable intensity) to the masker. Even in the absence of the precursor sound producing enhancement (a replica of the masker alone), discrimination of the two stimuli was generally possible when the target tone had a relatively low intensity. The paradigms used by Serman *et al.* (2008) and by Summerfield and his colleagues (Summerfield and Assmann, 1989; Summerfield *et al.*, 1984, 1987) were more similar to the paradigm used here, but the stimuli employed by these authors were quite different from ours since they consisted of vowel-like sounds or wideband noises. It is also worth mentioning that, in all of the previous comparisons between monaural and dichotic intensity enhancement, the precursor and test sounds were always contiguous in time. In the current experiment, by contrast, these two stimuli were separated by a 600-ms silent ISI, much longer than the stimuli themselves. We will come back to this point below.

The fact that dichotic enhancement had not been observed before might suggest that the enhancement phenomena observed here are not sensory effects but purely attentional effects. The precursor sounds that we used to elicit intensity enhancement contained a single “spectral

notch” and it is conceivable, in theory, that this spectral notch provided an attentional cue to the location of the target tone in the test sound. In the case of frequency enhancement, however, the precursor sounds provided no potential attentional cue: Since the frequency intervals between the chord components were random variables, the frequency of the target tone on a given trial could not be predicted from the frequency content of the precursor chord alone.

V. GENERAL DISCUSSION

Intensity enhancement is commonly believed to originate from some form of neural adaptation, which would weaken the auditory system’s response to the nontarget components of the test sound and/or the “suppression” (or inhibition) of the target component(s) by the nontarget components. From this point of view, the results of experiments 1 and 2 are somewhat surprising because one would expect to observe a significant reduction of enhancement when a wideband noise burst is inserted between the precursor and test sounds. We failed to observe such a reduction. Nevertheless, this failure does not provide conclusive evidence against the idea that the main source of enhancement is adaptation. For instance, adaptation might occur in a neural site responding to pure tones resolved in the auditory periphery but insensitive to wideband noise. Such a site should be very central. Thus, it might be that at this site, monaural tones presented to the left or the right ear elicit very similar neural responses. This would account for the dichotic form of intensity enhancement that we observed in experiment 3. Overall, therefore, our findings are compatible with the idea that intensity enhancement entirely stems from adaptation, but they imply that, if this is the case, the adaptation coming into play takes place at a high level of the auditory system.

A plausible hypothesis is that intensity enhancement can be produced at several levels of the auditory system. Enhancement is, generally speaking, a release from masking, and it is now clear that there are two distinct types of masking phenomena: “energetic” masking and “informational” masking. Energetic masking primarily results from mechanical limitations in the frequency analysis performed by the cochlea, whereas informational masking takes place centrally, depends on Gestalt factors, and is more malleable (Kidd *et al.*, 2008; Richards and Neff, 2004). Since the spectral components of our precursor and test sounds were always sufficiently spaced in frequency to be resolved in the cochlea, the enhancement phenomena investigated in the present study may well be releases from *informational* masking only. We have noted above that in all of the previous comparisons between monaural and dichotic intensity enhancement, the precursor and test sounds were always contiguous in time. Because of this temporal contiguity, it is reasonable to hypothesize that the monaural intensity enhancement previously compared to its dichotic counterpart was mainly a release from *energetic* masking, and was thus based on a mechanism differing from the source of the enhancement investigated here. One can understand in this way the apparent discrepancy between our results and those

previously reported regarding the possibility to produce dichotic intensity enhancement.

Our main goal was to determine if frequency enhancement and intensity enhancement are based on identical mechanisms. In this respect, experiment 3 suggests that the answer is negative since frequency enhancement appears to be less affected than intensity enhancement by a dichotic presentation of the precursor and test sounds. We found in fact that frequency enhancement is not weakened when the precursor and test sounds are presented to opposite ears rather than to the same ear. This was predictable under the hypothesis that frequency enhancement can be produced by means of automatic frequency-shift detectors (FSDs). There is now substantial psychophysical evidence for the existence of such detectors in the auditory system. In a study by Demany and Ramos (2005), listeners were presented with sound sequences consisting of a random chord of resolved pure tones, followed by a single test tone. In one experimental condition, called the “present/absent” condition, the test tone was either identical to a randomly selected component of the chord or positioned halfway in (log-) frequency between two components of the chord; the task was to judge if the test tone was present in the chord or not. In a second condition, called the “up/down” condition, the test tone was positioned 1-semitone above or below a randomly selected component of the chord, and the task was to identify the direction of the corresponding frequency shift. In the present/absent condition, performance was poor, not surprisingly because the components of the chords were very difficult to hear out individually as a consequence of informational masking. Nevertheless, and paradoxically, performance was good in the up/down condition. Subjects reported that, in the latter condition, they perceived the test tone as the end point of an ascending or descending melodic “motion” whose starting point was, subjectively, the chord as a whole rather than one of its components. This was an illusion because it was mandatory, for a good performance, to relate the test tone only to the closest chord component. The fact that a frequency shift between two tones could be heard even when the first tone was not audible individually provided evidence for the existence of automatic FSDs. Subsequent studies confirmed that suggestion and specified the properties of the FSDs (Demany and Ramos, 2007; Demany *et al.*, 2008, 2009, 2010, 2011; Cousineau *et al.*, 2009; Carcagno *et al.*, 2011). It was shown by Demany *et al.* (2011) that the FSDs are essentially insensitive to the presence of a wideband noise burst between two tones. Demany and Ramos (2007) and Carcagno *et al.* (2011) measured performance in the up/down task using monaural chords and test tones which were presented either to the same ear or contralaterally. They found that performance was barely poorer in the latter case than in the former case (d' decreased by 8.9%, on average), and they concluded that the FSDs are essentially insensitive to ear of input.

Many studies on auditory change detection by human listeners have focused on an event-related brain potential known as the “mismatch negativity (MMN)”. This brain potential is elicited by the presentation of a new sound among repetitions of the same sound. Any kind of acoustic novelty can produce

an MMN (see, e.g., Schröger, 1997, and May and Tiitinen, 2010, for reviews). Interestingly, it has been reported that the scalp topographies of the MMNs elicited by changes in frequency and by changes in intensity are not identical, suggesting that these two kinds of change are detected differently (Giard *et al.*, 1995; Rosburg, 2003). Moreover, it has also been reported that whereas the amplitude of the MMN elicited by a change in frequency is largely independent of whether or not the subject pays attention to the sound sequence, this is not the case for the MMN elicited by a change in intensity (Näätänen *et al.*, 1993; Woldorff *et al.*, 1991). These facts might be related to what we found in experiment 3. However, in the four MMN studies that we just mentioned, the intensity changes to be detected were always *decreases* in intensity. We believe that such changes cannot result in an enhancement of the changed acoustic entity (although Moore, 2003, Chap. 8, p. 281, suggests the opposite).

In an ecological perspective, one can easily see how the auditory system might take advantage of a change detection mechanism specialized in the processing of frequency changes. The auditory “objects” that must be identified in everyday life must be recognized in spite of changes in overall intensity since overall intensity varies with, e.g., the distance of the source. It is therefore useful to detect frequency changes independently of concomitant changes in intensity. This seems to be the case for the FSDs since, in the up/down task described above, performance is not poorer when the test tone following the chord is 20 dB lower than the chord components than when all tones have the same intensity Carcagno *et al.* (2011). At peripheral levels of the auditory system, frequency and intensity are encoded jointly because the range of frequencies to which a given neuron responds widens as intensity increases. However, in the primary auditory cortex of marmoset monkeys, Sadagopan and Wang (2008) found that many neurons are narrowly and separably tuned to both frequency and intensity. These authors speculate that, in some hierarchically higher cortical area, there might be a neural map in which neurons respond to frequency independently of intensity. It is tempting to hypothesize that the FSDs process the outputs of such neurons.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by a grant from the Agence Nationale pour la Recherche (Programme Blanc 2010). We thank Samuele Carcagno for helpful discussions and Neal F. Viemeister for comments on a previous version of the manuscript.

¹The term “enhancement” has been used by Hartmann and Goupell (2006) to describe the pop-out effect obtained when a tone is pulsed on and off among other tones presented continuously. In that case, of course, transient detection may play a role in the pop-out effect. Another recent study on the audibility of pulsed tones among continuous tones has been reported by Moore *et al.* (2009).

²This was found in a separate experiment on seven subjects. In that experiment, the detection threshold of a pure tone in a burst of pink noise was measured using a two-interval, two-alternative forced-choice task. On each trial, two independent 300-ms noise bursts at 72 dB (A) were successively presented, and a pure tone was added to either the first of the second noise, at random. This tone was gated on and off together with the noise.

Its frequency varied randomly from trial to trial, between 200 and 3200 Hz. Subjects had to indicate if the tone was presented in the first or the second noise. Responses were followed by visual feedback. The “weighted up-down” adaptive procedure (Kaernbach, 1991) was used to estimate the detection threshold of the tone, defined as the tone intensity for which the probability of a correct response was 0.75. At least three threshold estimates were made for each subject. The within-subject means of the threshold estimates varied from 54.4 to 58.8 dB across subjects, and the grand mean was 56.0 dB.

³These data were also submitted to a three-way analysis of variance, in which Subject was no longer the random factor but a fixed factor, like Ear modality and Type of change. The random factor was obtained by dividing the set of 400 trials performed by each subject in each condition into four successive subsets of 100 trials and computing a d' value from each of these subsets. The obtained d' values were always finite, except in one case (out of 96); in this exceptional case, d' was taken to be 3.04 following the common correction procedure for infinite d' values (see, e.g., Macmillan and Creelman, 1991, p. 10). The three-way analysis of variance confirmed that the interaction between Ear modality and Type of change was statistically significant [$F(1, 3) = 54.7, P = 0.0051$]. Note that the P value obtained from this analysis of variance was markedly lower than that obtained from the repeated-measures analysis of variance. By contrast, the three-way analysis of variance revealed no significant three-way interaction between Subject, Ear modality, and Type of change [$F(5, 15) < 1$].

- Bacon, S. P., and Moore, B. C. J. (1987). “Transient masking and the temporal course of simultaneous tone-on-tone masking,” *J. Acoust. Soc. Am.* **81**, 1073–1077.
- Byrne, A. J., Stellmack, M. A., and Viemeister, N. F. (2011). “The enhancement effect: Evidence for adaptation of inhibition using a binaural centering task,” *J. Acoust. Soc. Am.* **129**, 2088–2094.
- Carcagno, S., Semal, C., and Demany, L. (2011). “Frequency-shift detectors bind binaural as well as monaural frequency representations,” *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* (in press).
- Carlyon, R. P. (1989). “Changes in the masked threshold of brief tones produced by prior bursts of noise,” *Hear. Res.* **41**, 223–236.
- Cousineau, M., Demany, L., and Pressnitzer, D. (2009). “What makes a melody: The perceptual singularity of pitch sequences,” *J. Acoust. Soc. Am.* **126**, 3179–3187.
- Demany, L., Pressnitzer, D., and Semal, C. (2009). “Tuning properties of the auditory frequency-shift detectors,” *J. Acoust. Soc. Am.* **126**, 1342–1348.
- Demany, L., and Ramos, C. (2005). “On the binding of successive sounds: Perceiving shifts in nonperceived pitches,” *J. Acoust. Soc. Am.* **117**, 833–841.
- Demany, L., and Ramos, C. (2007). “A paradoxical aspect of auditory change detection,” in *Hearing—From Sensory Processing to Perception*, edited by B. Kollmeier, G. Klump, V. Hohmann, U. Langemann, M. Mauermann, S. Uppenkamp, and J. Verhey (Springer, Heidelberg), pp. 313–321.
- Demany, L., Semal, C., Cazalets, J. R., and Pressnitzer, D. (2010). “Fundamental differences in change detection between vision and audition,” *Exp. Brain Res.* **203**, 261–270.
- Demany, L., Semal, C., and Pressnitzer, D. (2011). “Implicit versus explicit frequency comparisons: Two mechanisms of auditory change detection,” *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* **37**, 597–605.
- Demany, L., Trost, W., Serman, M., and Semal, C. (2008). “Auditory change detection: Simple sounds are not memorized better than complex sounds,” *Psychol. Sci.* **19**, 85–91.
- Deutsch, D. (1979). “Binaural integration of melodic patterns,” *Percept. Psychophys.* **25**, 399–405.
- Gallun, F. J. (2003). “The role of stimulus envelope in the detection of brief increments in the intensity of a tone,” doctoral dissertation, University of California, Berkeley, Chap. 3, pp. 22–58.
- Giard, M. H., Lavikainen, J., Reinikainen, K., Perrin, F., Bertrand, O., Pernier, J., and Näätänen, R. (1995). “Separate representations of stimulus frequency, intensity, and duration in auditory sensory memory,” *J. Cogn. Neurosci.* **7**, 133–143.
- Green, D. M., and Swets, J. A. (1974). *Signal Detection Theory and Psychophysics* (Krieger, NY), Chap. 3, pp. 53–85.
- Haftner, E. R., Bonnel, A.-M., Gallun, E., and Cohen, E. (1998). “A role for memory in divided attention between two independent stimuli,” in *Psychophysical and Physiological Advances in Hearing*, edited by A. R. Palmer, A. Rees, A. Q. Summerfield, and R. Meddis (Whurr, London), pp. 228–238.

- Hartmann, W. M., and Goupell, M. J. (2006). "Enhancing and unmasking the harmonics of a complex tone," *J. Acoust. Soc. Am.* **120**, 2142–2157.
- Kaernbach, C. (1991). "Simple adaptive testing with the weighted up-down method," *Percept. Psychophys.* **49**, 227–229.
- Kidd, G., Mason, C. R., and Gallun, F. J. (2005). "Combining energetic and informational masking for speech identification," *J. Acoust. Soc. Am.* **118**, 982–992.
- Kidd, G., Mason, C. R., Richards, V. M., Gallun, F. J., and Durlach, N. I. (2008). "Informational masking," in *Auditory perception of Sound Sources*, edited by W. A. Yost, A. N. Popper, and R. R. Fay (Springer, New York), Chap. 6, pp. 143–189.
- Kidd, G., and Wright, B. A. "Improving the detectability of a brief tone in noise using forward and backward masker fringes: Monotic and dichotic presentations," *J. Acoust. Soc. Am.* **95**, 962–967 (1994).
- Kubovy, M., and Howard, F. P. (1976). "Persistence of a pitch-segregating echoic memory," *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* **2**, 531–537.
- Macmillan, N. A. (1971). "Detection and recognition of increments and decrements in auditory intensity," *Percept. Psychophys.* **10**, 233–238.
- Macmillan, N. A. (1973). "Detection and recognition of intensity changes in tone and noise: The detection-recognition disparity," *Percept. Psychophys.* **13**, 67–75.
- Macmillan, N. A., and Creelman, C. D. (1991). *Detection Theory: A User's Guide* (Cambridge University Press, New York), p. 10.
- May, P. J. C., and Tiitinen, H. (2010). "Mismatch negativity (MMN), the deviance-elicited auditory deflection, explained," *Psychophysiology* **47**, 66–122.
- Moore, B. C. J. (2003). *An Introduction to the Psychology of Hearing* (Elsevier, Amsterdam), Chap. 8, p. 281.
- Moore, B. C. J., Glasberg, B. R., and Jepsen, M. L. (2009). "Effects of pulsing of the target tone on the audibility of partials in inharmonic complex tones," *J. Acoust. Soc. Am.* **125**, 3194–3204.
- Näätänen, R., Paavilainen, P., Tiitinen, H., Jiang, D., and Alho, K. (1993). "Attention and mismatch negativity," *Psychophysiology* **30**, 436–450.
- Nelson, P. C., and Young, E. D. (2010). "Neural correlates of context-dependent perceptual enhancement in the inferior colliculus," *J. Neurosci.* **30**, 6577–6587.
- Palmer, A. R., Summerfield, Q., and Fantini, D. A. (1995). "Responses of auditory nerve fibres to stimuli producing psychophysical enhancement," *J. Acoust. Soc. Am.* **97**, 1786–1799.
- Richards, V. M., and Neff, D. L. (2004). "Cuing effects for informational masking," *J. Acoust. Soc. Am.* **115**, 289–300.
- Rosburg, T. (2003). "Left hemispheric dipole locations of the neuromagnetic mismatch negativity to frequency, intensity and duration deviants," *Cogn. Brain Res.* **16**, 83–90.
- Sadagopan, S., and Wang, X. (2008). "Level invariant representation of sounds by populations of neurons in primary auditory cortex," *J. Neurosci.* **28**, 3415–3426.
- Serman, M., Semal, C., and Demany, L. (2008). "Enhancement, adaptation, and the binaural system," *J. Acoust. Soc. Am.* **123**, 4412–4420.
- Scharf, B., Reeves, A., and Giovanetti, H. (2008). "Role of attention in overshoot: Frequency certainty versus uncertainty," *J. Acoust. Soc. Am.* **123**, 1555–1561.
- Schröger, E. (1997). "On the detection of auditory deviations: A pre-attentive activation model," *Psychophysiology* **34**, 245–257.
- Strickland, E. A. (2004). "The temporal effect with notched-noise maskers: Analysis in terms of input-output functions," *J. Acoust. Soc. Am.* **115**, 2234–2245.
- Summerfield, A. Q., and Assmann, P. F. (1989). "Auditory enhancement and the perception of concurrent vowels," *Percept. Psychophys.* **45**, 529–536.
- Summerfield, A. Q., Haggard, M. P., Foster, J. R., and Gray, S. (1984). "Perceiving vowels from uniform spectra: Phonetic exploration of an auditory after effect," *Percept. Psychophys.* **35**, 203–213.
- Summerfield, A. Q., Sidwell, A., and Nelson, T. (1987). "Auditory enhancement of changes in spectral amplitude," *J. Acoust. Soc. Am.* **81**, 700–708.
- Ulanovsky, N., Las, L., and Nelken, I. (2003). "Processing of low-probability sounds by cortical neurons," *Nat. Neurosci.* **6**, 391–398.
- Viemeister, N. F. (1980). "Adaptation of masking," in *Psychophysical, Physiological and Behavioural Studies in Hearing*, edited by G. van den Brink and F. A. Bilsen (Delft University Press, Delft, The Netherlands), pp. 190–199.
- Viemeister, N. F., and Bacon, S. P. (1982). "Forward masking by enhanced components in harmonic complexes," *J. Acoust. Soc. Am.* **71**, 1502–1507.
- Warren, R. M., and Bashford, J. A. (1976). "Auditory contralateral induction: An early stage in binaural processing," *Percept. Psychophys.* **20**, 380–386.
- Woldorf, M. G., Hackley, S. A., and Hillyard, S. A. (1991). "The effects of channel-selective attention on the mismatch negativity wave elicited by deviant tones," *Psychophysiology* **28**, 30–42.

Chapitre 5

Le rehaussement pour étudier les relations entre perception et mémoire auditives chez des enfants et adultes porteurs d'autisme et neurotypiques

Sommaire

5.1	Méthode	121
5.1.1	Participants	121
5.1.2	Protocole expérimental	122

5.2	Résultats	126
5.3	Discussion	130

La première étude de cette thèse n'a pas permis de dissocier perception et mémoire sur la base de détection de bruits périodiques. En revanche, elle a mis en lumière un trouble dans le développement des traitements auditifs des adultes porteurs d'autisme, dont les performances sont similaires à celles des enfants (porteurs d'autisme et neurotypiques), et significativement inférieures à celles des adultes neurotypiques ayant passé la même expérience. Ce trouble est-il plutôt mnésique ou perceptif ? Il est impossible de trancher.

Le rehaussement résulte de l'influence de la perception d'un stimulus (précurseur) sur la perception d'un stimulus subséquent (test). Il fait donc intervenir la mémoire auditive implicite en ce sens que la perception du précurseur va modifier la perception du test, en mettant auditivement en évidence une partie de ce dernier, alors qu'écouté seul, aucun élément du test ne semble plus saillant que les autres. Dans cette nouvelle étude portant sur le rehaussement, les stimuli sont des accords constitués de plusieurs sons purs.

Une manière classique d'étudier la mémoire auditive est d'observer les performances de participants dans une tâche de comparaison de deux stimuli séparés par un délai variable (voir par exemple Wickelgren 1969 ; Deutsch 1975 ; Clément et al. 1999). Une estimation de l'empan temporel mnésique (quantité d'informations retenues en fonction de la durée) apparaît lorsque l'on compare les performances dans les conditions où le délai entre les deux stimuli est court, et lorsque ce dernier est long.

Dans notre protocole expérimental, nous avons distingué deux conditions : l'une où le précurseur et le test étaient consécutifs, et la deuxième où le précurseur et le test étaient séparés par un silence. La comparaison entre les performances dans la condition où le délai entre les accords est court et les performances dans la condition où le délai entre les accords est long donne l'empan temporel mnésique. Une condition mesurant davantage la perception est également prévue, toujours dans l'objectif de dissocier les deux fonctions que sont la perception et la mémoire. Lorsque le phénomène de rehaussement est illustré par l'utilisation d'accords de sons purs, il est possible d'en distinguer deux sortes : le rehaussement d'intensité et le rehaussement de fréquence. La deuxième étude de cette thèse a permis de dissocier les deux types de rehaussement en termes de mécanismes qui les sous-tendent (voir chapitre précédent).

Dans cette étude, du rehaussement de fréquence a été utilisé, puisque cet effet reposerait sur l'activation de FSD (Erviti et al. 2011 ; Demany et al. 2013) lors de l'identification de la direction d'un changement de fréquence. Semal et al. (2006) ont émis l'hypothèse selon laquelle l'identification d'un changement de fréquence entre de sons purs pourrait être due à l'action des FSD. Le rehaussement de fréquence semble plus approprié pour étudier les capacités perceptivo-mnésiques des personnes porteuses d'autisme dans la mesure où plusieurs études ont déjà observé chez ces personnes un traitement de la fréquence atypique (Bonnell et al. 2003, 2010, Jones et al. 2009). Plus particulièrement, leurs performances dans les tâches de catégorisation de

hauteurs sont supérieures à celles des personnes neurotypiques (Bonnell et al. 2003, Heaton et al. 2005, décrites précédemment). Cette capacité atypique des personnes porteuses d'autisme à identifier la direction d'un changement de fréquence est peut-être due à la présence de FSD plus performants dans leur système auditif central.

Le premier objectif de cette étude est de clarifier les relations entre perception et mémoire auditive. Le second objectif est de clarifier la nature du trouble développemental observé chez des adultes porteurs d'autisme dans la première étude de cette thèse lors d'une tâche de détection de la périodicité dans du bruit. Pour cela, les performances perceptives et mnésiques (mesurées sur plusieurs formes de mémoire) d'enfants et d'adultes porteurs d'autisme, et d'enfants et d'adultes neurotypiques seront recueillies.

5.1 Méthode

5.1.1 Participants

13 enfants et adolescents porteurs d'autisme (âge moyen = 12 ans), 13 enfants et adolescents neurotypiques (âge moyen = 12 ans), 11 adultes porteurs d'autisme (âge moyen = 21 ans) et 16 adultes neurotypiques (âge moyen = 21 ans) ont participé à cette expérience. Les participants porteurs

d'autisme ont tous été recrutés au CRA d'Aquitaine, Hôpital Charles Perrens, Bordeaux. Leur diagnostic a été attesté par une équipe pluridisciplinaire spécialisée dans les troubles du développement. Ils étaient tous porteurs d'autisme de haut niveau ($QI > 70$, Tsai 1992). Environ 60% des enfants (neurotypiques et porteurs d'autisme), 100% des adultes porteurs d'autisme et 40% des adultes neurotypiques avaient déjà passé l'expérience portant sur la détection de la périodicité dans du bruit. Les participants n'ayant pas pris part à la première expérience ont passé un audiogramme avant de commencer la séance de test.

5.1.2 Protocole expérimental

Dans cette expérience, le stimulus est composé de 2 séquences, elles-mêmes composées de 2 accords et d'un son pur. Elles sont présentées de la manière suivante : accord1, accord2, son pur1, suivi de accord1, accord2, son pur2.

Les accords sont des complexes de sons purs déterminés de la manière suivante : la fréquence du composant le plus grave est choisie aléatoirement dans une gamme de fréquence allant de 400 Hz à 1800 Hz. La fréquence du composant le plus aigu est calculée de façon à ce que l'intervalle entre les deux composants extrêmes soit 2200 cents. La fréquence des composants intermédiaires est calculée de façon à ce qu'ils soient régulièrement espacés entre eux.

La tâche est composée de 3 conditions, deux conditions où du rehaussement de fréquence se produit, et la troisième condition où il n'y a pas de rehaussement. Chaque condition est passée 3 fois, dans un ordre contrebalancé. Des pauses ont été aménagées dans la séance (2 pour les enfants, 1 pour les adultes). Dans les deux conditions où du rehaussement se produit, les deux accords de chaque séquence sont composés de plusieurs sons purs de fréquences identiques, à l'exception d'un composant, dont la fréquence sera variée d'un demi ton entre le précurseur et le test. Les deux conditions avec rehaussement sont différenciées par la longueur du délai entre les deux accords (courte : 0 s, longue : 0,5 s). Le rehaussement est objectivé par l'insertion d'un son pur à la suite du deuxième accord. La fréquence de ce son pur sera soit la même que celle du composant cible, soit à une valeur intermédiaire entre deux composants adjacents.

Dans la condition sans rehaussement, les deux accords sont strictement identiques. Un son pur est également placé à la suite du deuxième accord. Sa fréquence est soit celle d'un des composants de l'accord, soit une fréquence intermédiaire entre deux composants. Lors de la passation de l'expérience, le participant entend un stimulus composé des deux séquences, (soit une séquence où la fréquence du son pur est identique à celle du son rehaussé, et une séquence où la fréquence du son pur est intermédiaire). Il doit déterminer dans laquelle des séquences la fréquence du son pur est celle du son rehaussé, et répondre en cliquant via une interface graphique (Figure 5.1).

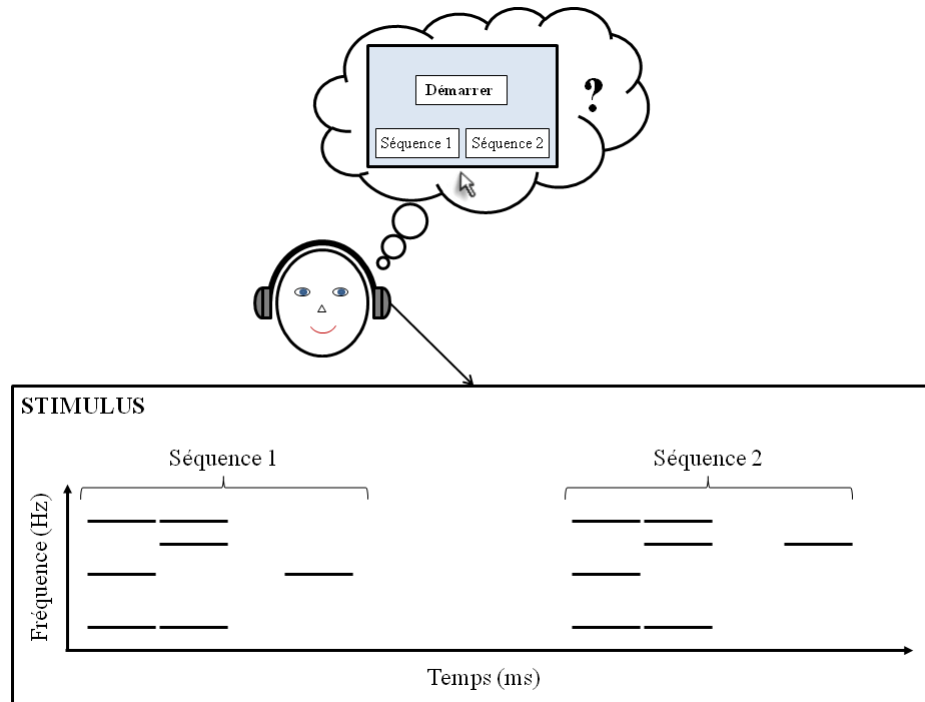


FIGURE 5.1 – Protocole expérimental. Le participant entend deux séquences séparées par 1 seconde de silence. Dans l’une d’elles, la fréquence du son pur est celle du composant rehaussé, dans l’autre, elle se situe entre les fréquences de deux composants adjacents de l’accord. Le participant doit déterminer dans laquelle des deux séquences la fréquence du son pur était identique à celle du composant rehaussé en cliquant sur le bouton correspondant.

En cas de bonne réponse, le nombre de composants de l’accord est augmenté (le niveau de difficulté augmente), en cas de mauvaise réponse, le nombre de composants est diminué (le nombre minimal de composants est 2). Cette variation dans le nombre de composants est réalisée selon les

règles d'une procédure adaptative (Kaernbach 1991). Un feedback lumineux était donné au participant, le bouton sur lequel il avait cliqué se colorant en vert en cas de bonne réponse, et en rouge en cas de mauvaise réponse. Cela assurait un caractère ludique pour les jeunes passant cette expérience.

Avant le début du premier bloc d'essai, chaque participant a passé un court programme d'entraînement lors duquel il a appris, dans un premier temps, ce qu'était un accord de son en écoutant 3 sons purs séparément, puis en accord. Il a ensuite écouté une séquence composée de deux accords et d'un son pur. Cette séquence faisait intervenir du rehaussement de fréquence, et la fréquence du son pur était celle du son rehaussé. Une simulation de l'expérience lui était alors présentée, par le biais d'une tâche oui/non. Le participant entendait une séquence d'accord puis un son pur. Toutes les séquences faisaient intervenir du rehaussement de fréquence. La fréquence du son pur pouvait être celle du composant rehaussé, ou une fréquence intermédiaire entre deux composants adjacents. Le nombre de composants n'excédait pas 3, rendant la tâche très facile. L'expérience à proprement parler démarrait lorsque chaque participant obtenait plus de 85% de bonnes réponses à l'entraînement, confirmant qu'il entendait bien le rehaussement et que la tâche avait été comprise.

Un seuil, en termes de nombres de composants, est recueilli à la fin de chaque bloc d'essai. Nos trois conditions nous permettront donc d'obtenir trois mesures, la première, sous la forme de performances brutes,

et les deux suivantes sous la forme de deux indices, l'un mesurant la force du rehaussement (en comparant les performances dans la condition de rehaussement de fréquence sans délai avec celles de la condition sans rehaussement. Cette dernière ne présente pas non plus de délai entre la présentation des accords). Cet indice devrait nous apporter des performances dont la part perceptive est plus importante que la part mnésique. Un deuxième indice sera calculé, en comparant les deux conditions où le rehaussement de fréquence intervient. Dans la mesure où ce qui les distingue est le délai entre la présentation des accords, cet indice nous donnera une estimation de la capacité en mémoire auditive.

5.2 Résultats

Une ANOVA à 3 facteurs [Tâche $\times$ Age $\times$ Clinique] a été calculée sur les performances en nombre de composants moyen par accord.

L'analyse des résultats a montré :

- Un effet principal de la tâche ($F(2,98) = 14,458$; $P = 0.000$), la condition de rehaussement sans délai étant mieux réussie que la condition de rehaussement avec délai, et les deux conditions avec rehaussement étant mieux réussies que la condition contrôle (Figure 5.2).

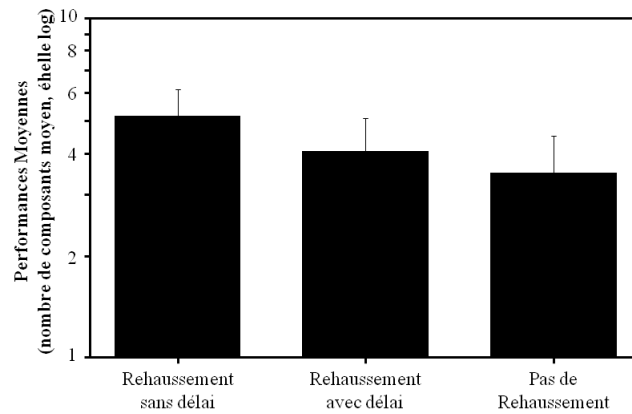


FIGURE 5.2 – Performances moyennes de l'ensemble des sujets (avec erreur-type) pour chacune des trois conditions.

Les performances dans la tâche de rehaussement sans délai entre les accords sont significativement meilleures que celles de la tâche de rehaussement avec délai ($t(52) = 3,555$; $P = 0.001$), et les deux conditions avec rehaussement ont été significativement mieux réussies que la condition sans rehaussement ($t(52) = 4,305$; $P = 0.000$ pour le rehaussement sans délai, et $t(52) = 2,452$; $P = 0.018$ pour le rehaussement avec délai).

- Un effet principal de l'âge ($F(1,49) = 9,407$; $P = 0.004$), les performances des adultes étant meilleures que celles des enfants (porteurs d'autisme et neurotypiques)

- Une interaction [Tâche $\times$ Age] ($F(2,98) = 7,566$; $P = 0.001$), les performances des adultes étant meilleures que celles des enfants (porteurs d'autisme et neurotypiques) dans la condition de rehaussement sans délai (la plus facile) (Figure 5.3)

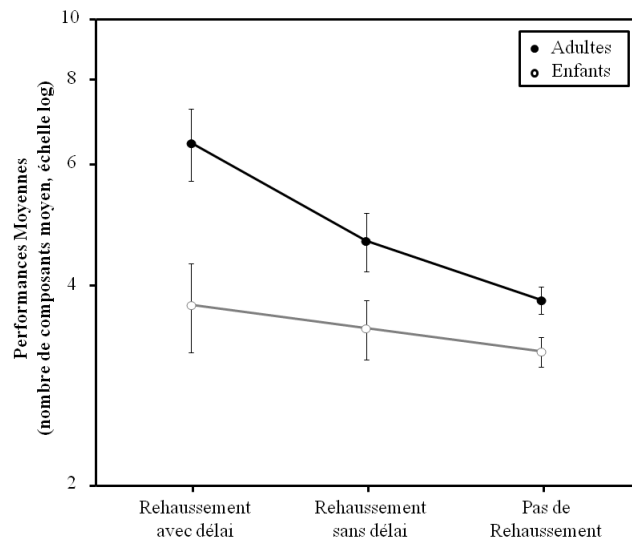


FIGURE 5.3 – Performances moyennes (avec erreur-type) pour les adultes (en noir) et les enfants (en gris), porteurs d'autisme et neurotypiques confondus, dans chacune des trois conditions.

Aucune analyse concernant le facteur clinique ne s'est révélée significative ($F(1,49) = 1,715$; $P = 0.196$ pour l'effet principal du facteur clinique), suggérant que les participants porteurs d'autisme, enfants ou adultes, ont obtenu des performances similaires à celles des participants neurotypiques qui leurs sont appariés en âge.

La force du rehaussement a été calculée en soustrayant les performances obtenues dans la condition contrôle aux performances obtenues dans la condition sans délai.

Une ANOVA à deux facteurs [Age $\times$ Clinique] a été calculée sur cet indice de force du rehaussement. L'analyse des résultats a montré un effet principal de l'âge ($F(1,49) = 9,456$; $P = 0,003$) suggérant que l'effet de rehaussement est plus fort chez les adultes que chez les enfants. Encore une fois, aucune analyse impliquant le facteur clinique ne s'est avérée significative, indiquant que le rehaussement était perçu de la même façon par les participants porteurs d'autisme et les participants neurotypiques dans leurs groupes d'âge respectifs.

L'effet du délai a été objectivé en soustrayant les performances dans la condition de rehaussement avec délai à celles de la condition de rehaussement sans délai. Une ANOVA à deux facteurs [Age $\times$ Clinique] a été calculée sur cet indice de délai. A nouveau, l'analyse des résultats a montré un effet principal de l'âge ($F(1,49) = 9,436$; $P = 0.003$), suggérant que l'effet du délai a été plus important pour les adultes que pour les enfants. Aucune analyse impliquant le facteur clinique ne s'est révélée significative, indiquant que l'effet du délai était similaire pour les participants porteurs d'autisme et les participants neurotypiques dans leurs groupes d'âge respectifs.

Le «trouble» du traitement auditif observé chez les adultes porteurs d'autisme dans l'étude portant sur la détection de la périodicité de bruit

blanc n'a pas été constaté lors de la réalisation des différentes conditions de rehaussement (sans délai, avec délai et sans rehaussement). En effet, les performances des adultes porteurs d'autisme ont été tout à fait similaires à celles des adultes neurotypiques quelle que soit la condition ($t(25) = 1,467$; $P = 0,155$ pour la condition de rehaussement sans délai, $t(25) = 0,08$; $P = 0,431$ pour la condition de rehaussement avec délai, et $t(25) = 0,931$; $P = 0,361$ pour la condition sans rehaussement). En revanche, comme dans l'étude portant sur la détection de la périodicité de bruit blanc, les enfants porteurs d'autisme ont obtenu des performances similaires à celles des enfants neurotypiques.

Pour résumer : les adultes (porteurs d'autisme et neurotypiques confondus) présentent un effet de rehaussement plus fort que les enfants. Il n'y a aucun effet de la pathologie sur les performances aux trois conditions.

5.3 Discussion

Le premier résultat que nous avons observé est la supériorité des performances des adultes (porteurs d'autisme ou neurotypiques) par rapport à celles des enfants (porteurs d'autisme et neurotypiques). A ma connaissance, aucune étude n'a étudié le développement longitudinal de

la perception du rehaussement. En revanche, la tâche de rehaussement s'apparente à une tâche de masquage proactif («forward masking»), dont le développement avec l'âge a été étudié. Le masquage proactif se produit lors du masquage d'un son par un autre son se terminant plusieurs millisecondes avant le début du deuxième son. Le masquage proactif est mature précocément (de quelques mois à environ une dizaine d'années selon les études, Werner et al. 1999, Buss et al. 1999). Il est probable que la perception du rehaussement soit également mature à cet âge-là. Les enfants ayant participé à cette étude étaient majoritairement plus âgés que 10 ans, et les performances des enfants plus jeunes ne différaient pas de celles des enfants plus âgés. La perception du rehaussement des participants à cette étude était donc probablement mature.

Concernant le développement de la mémoire auditive, plusieurs études ont été réalisées, sur des sons harmoniques (Gomes et al. 1999 ; Glass et al. 2008). Ces études ont montré que la durée de rétention des informations augmentait avec l'âge. En revanche, des enfants à partir de 2 ans sont capables de retenir des informations auditives pour le délai utilisé dans cette étude (500 ms). Il est peu probable que cette différence d'âge soit imputable à des stratégies de réponse différentes, dans la mesure où tous les participants de la première étude semblent avoir utilisé des stratégies de réponse similaire. Il n'y a pas de raison de penser que les participants de cette dernière étude aient utilisé des stratégies de réponse différentes.

Dans cette expérience, le résultat le plus inattendu a été la similarité des performances entre les participants porteurs d'autisme et les participants neurotypiques, quelle que soit la condition de test. Erviti et al. (2011) et plus récemment Demany et al. (2013) ont suggéré que les FSD, des détecteurs automatiques de changement de la fréquence, pourraient être à l'origine du rehaussement de fréquence. Les FSD, comme cela a été mentionné précédemment, seraient constitués en deux sous-ensembles avec des préférences directionnelles opposées, l'un répondant préférentiellement à des augmentations de fréquence, l'autre à des diminutions. Lors de la perception d'une séquence de sons activant les deux sous ensembles de FSD, la direction du changement perçue est celle du sous ensemble dont l'activation est la plus forte. Deux études (Bonnell et al. 2003; Heaton et al. 2005, décrites précédemment) ont montré que les performances dans des tâches de catégorisation de hauteur (grave/aigu ou monte/baisse) étaient meilleures chez les participants porteurs d'autisme. Plusieurs hypothèses ont été posées pour expliquer ce phénomène, notamment que les personnes porteuses d'autisme bénéficieraient peut-être de FSD plus performants que ceux de personnes neurotypiques. Si le rehaussement de fréquence est bien basé sur l'action des FSD, cette hypothèse doit être rejetée au profit de l'hypothèse d'une meilleure discrimination de la hauteur (Heaton et al. 2005) et ainsi, une identification du sens du changement plus facile, ou de l'hypothèse d'un encodage plus précis du premier son permettant une

meilleure comparaison de ce dernier avec le son suivant (Bonnell et al. 2003), et donc une meilleure catégorisation du sens du changement de fréquence.

Pourtant, les hypothèses d’une perception plus «fine» ou d’une mémoire «surdéveloppée» semblent également à remettre en cause.

Cette expérience était constituée de trois conditions, la première où le précurseur et le test étaient présentés successivement sans délai entre eux, un des composants du précurseur étant inférieur en fréquence d’un demi ton, la deuxième où précurseur et test étaient présentés séparés par un silence de 500 ms, et où comme pour la première condition, précurseur et test étaient différents, et la troisième où précurseur et test étaient strictement identiques, et présentés l’un après l’autre sans silence pour les séparer. Les deux premières conditions, faisant intervenir du rehaussement impliquent l’activation d’une forme de mémoire implicite (dans la mesure où elle se manifeste par la rétention de stimuli non perçus consciemment). La troisième condition est une condition de perception pure.

Ces trois conditions reviennent à réaliser une tâche présent/absent, c’est-à-dire à déterminer si le son pur était présent ou absent dans l’accord le précédant. Pour chacune d’entre elles, les participants entendaient une séquence où le son était présent et une séquence où le son était absent. Une contrainte de mémoire était donc ajoutée : dans le cas où à l’écoute de la première séquence, puis de la seconde, le participant n’était pas sûr de sa réponse, il devait se souvenir des deux séquences pour pouvoir les comparer.

Cette expérience fait donc intervenir la perception auditive et plusieurs formes de mémoire, et pourtant quelle que soit la condition, les performances des participants porteurs d'autisme ne diffèrent pas de celles des participants neurotypiques. De plus, si l'étude de Bonnel et al. (2003) portait sur la catégorisation de fréquences de sons purs, celle de Heaton (2005) utilisait des sons plus complexes (notes de piano), il est donc peu probable que la complexité de nos accords de sons purs ait dégradé la performance supérieure qu'auraient pu obtenir les participants porteurs d'autisme. Par ailleurs, nos accords de sons sont spectralement complexes, et d'après plusieurs études citées précédemment (Bonnel et al. 2010 ; Samson et al. 2010), le traitement des sons spectralement complexes est normal chez les personnes porteuses d'autisme.

En revanche, Clément et al. (1999) ont montré que la mémoire pour la hauteur tonale constituait une forme de mémoire particulière, différente par exemple de la mémoire pour l'intensité. En effet, la trace mnésique de la hauteur tonale est conservée plus longtemps. De plus, Heaton (2003) a fait passer deux tâches de décomposition d'accords à des enfants porteurs d'autisme de haut niveau, et à des enfants neurotypiques. Dans la première, les accords étaient composés de trois notes de piano parmi 4. L'association de chacune de ces 4 notes avec un animal avait été apprise avant de passer cette tâche. Il était demandé aux enfants de montrer l'animal correspondant à la quatrième note de piano, c'est-à-dire celle qui n'était pas dans l'accord. Dans la deuxième tâche, les enfants entendaient un accord de trois notes

suivi d'une note seule et devaient dire si la note était dans l'accord ou non. Ensuite les trois notes de l'accord étaient jouées les unes après les autres, puis l'accord, puis la note seule était présentée, et les enfants devaient à nouveau dire si la note isolée était dans l'accord ou non. L'analyse des résultats a montré que les enfants porteurs d'autisme ont obtenu des performances supérieures à celles des enfants neurotypiques dans la tâche où les notes étaient déjà associées à un animal, et donc dont la hauteur était déjà mémorisée. En revanche, lorsqu'il s'agissait simplement de décomposer l'accord, les participants porteurs d'autisme ont présenté des performances similaires à celles des participants neurotypiques.

Cela suggère que la mémoire de la hauteur tonale joue un rôle dans les capacités auditives supérieures des personnes porteuses d'autisme.

La deuxième constatation majeure faite à la suite de l'analyse des résultats est l'absence du trouble développemental observé lors de la première expérience de cette thèse. Dans cette expérience, portant sur la détection de la périodicité lors de répétition de segments de bruit blanc, il est apparu que les adultes porteurs d'autisme présentaient des performances très inférieures à celles des adultes neurotypiques, et similaires à celles des enfants, qu'ils soient porteurs d'autisme ou non, quand les performances de ces enfants porteurs d'autisme ne différaient pas de celles des enfants neurotypiques. Il semblait donc qu'à un moment donné, le développement des traitements auditifs se soient arrêtés, ne permettant pas aux adultes porteurs d'autisme d'obtenir des performances aussi hautes que celles des adultes neurotypiques.

De façon surprenante, cela n'a pas été le cas ici. Quelle que soit la condition, les adultes porteurs d'autisme ont obtenu des performances similaires à celles des adultes neurotypiques, et supérieures à celles des enfants, qu'ils soient ou non porteurs d'autisme.

L'explication la plus probable se situe sur la nature même des stimuli utilisés dans chaque tâche. Les bruits périodiques sont spectralement complexes (ils contiennent toutes les fréquences) mais aussi temporellement complexes (ils sont très variables au cours du temps). En revanche, les accords de sons purs sont spectralement complexes (ils sont constitués de plusieurs sons purs, donc de plusieurs fréquences, mais beaucoup moins que les bruits blancs) mais sont temporellement simples (ils sont statiques dans le temps).

Les performances des personnes porteuses d'autisme étant inférieures à celles des personnes neurotypiques dans le seul cas où les stimuli étaient temporellement complexes, la nature du trouble développemental observé dans la première étude de ce travail est probablement d'origine purement perceptive. Par ailleurs, plusieurs études (Alcantara et al., 2004; Groen et al., 2009, Alcantara et al., 2012) ont observé un déficit dans le traitement temporel de sons complexes de personnes porteuses d'autisme.

De plus, la dernière expérience de cette thèse fait intervenir différentes sortes de mémoire : une forme de mémoire implicite à court et à plus long terme, et une forme de mémoire plus explicite sans que cela ne dégrade les

performances des personnes porteuses d'autisme. Il est donc probable que la mémoire auditive de ces derniers soit intacte.

Pour résumer, la mémoire auditive des personnes porteuses d'autisme semble donc préservée lors du développement de l'audition. En revanche, l'aspect temporel de la perception semble se dégrader lors du développement, comme le montre un trouble dans la détection des bruits périodique à l'âge adulte, mais pas dans l'enfance. Cette idée est en faveur d'une distinction entre la mémoire et la perception auditive.

Conclusion

L'objectif de ce travail de thèse était de déterminer si la perception auditive et la mémoire auditive sont deux fonctions dissociables, sous-tendues par deux mécanismes différents. Pour cela, deux études ont été conçues, incluant une population de participants porteurs d'autisme de haut niveau. En effet, ces derniers présentent des particularités dans le traitement auditif. Ces particularités peuvent être interprétées à la lumière de capacités perceptives et/ou mnésiques, sans que rien ne permette de déterminer si l'une, l'autre ou les deux fonctions cognitives que sont la perception et la mémoire, sont impliquées.

La première étude (voir ci-dessous) faisait intervenir des bruits périodiques, c'est-à-dire un même segment de bruit blanc répété un certain nombre de fois. La détection de la périodicité est un bon indicateur d'une forme de mémoire sensorielle (non verbale), dans la mesure où elle s'effectue (au-delà d'une certaine fréquence de répétition) par la détection de récurrences d'éléments saillants dans chaque segment de bruit blanc répété. La nature de ces indices demeure obscure, et il est probable que

ces indices dépendent du bruit généré ainsi que de l'auditeur. Ainsi, à partir de la deuxième présentation du segment (ou même de la première pour les auditeurs entraînés), ces éléments sont détectés, et stockés en mémoire. A la présentation suivante, ces mêmes éléments sont à nouveau détectés, comparés à ceux en mémoire. L'auditeur pourra alors décider si le stimulus perçu est périodique ou s'il ne l'est pas.

Dans cette première étude, deux expériences ont été passées : l'une mesurant des facteurs perceptifs et l'autre des facteurs mnésiques. Des travaux (Wright et Zecker, 2004) ayant montré que le développement de certains traitements auditifs s'arrêtait à l'adolescence chez des personnes porteuses de troubles des apprentissages basés sur le langage, les participants porteurs d'autisme et neurotypiques ont été distingués en deux groupes d'âges : enfants et adultes.

Notre étude devait permettre d'amener des éléments étayant l'hypothèse selon laquelle l'autisme serait caractérisé par une perception et/ou une mémoire auditive surdéveloppée, de dissocier l'influence des facteurs mnésiques et perceptifs dans ces performances particulières, et d'étudier le développement des traitements auditifs chez des jeunes et des adultes porteurs d'autisme. L'analyse des résultats n'a pas permis de mettre en évidence de différence dans la réalisation des deux tâches de perception et de mémoire. En revanche, un «trouble» du traitement auditif a été observé chez les adultes porteurs d'autisme, avec des performances très inférieures à celles des adultes neurotypiques, quand les enfants porteurs d'autisme

présentent des performances similaires à celles des enfants neurotypiques. Ce «trouble» du développement ne peut s'expliquer par des stratégies de prise de décision différentes entre les participants porteurs d'autisme et les participants neurotypiques. En revanche, nos résultats pourraient s'expliquer par un «trouble» dans le développement de la mémoire auditive des adultes porteurs d'autisme. De même, si la perception des sons simples semble être supérieure chez les personnes porteuses d'autisme, lorsque les sons se complexifient, un déficit dans le traitement de l'aspect temporel des sons se produirait. Nos résultats peuvent donc potentiellement être expliqués par un déficit dans le traitement temporel de nos sons complexes.

N'étant pas parvenus à identifier si ce trouble était plutôt de nature mnésique, perceptive, ou les deux, nous avons poursuivi nos recherches sur la perception et la mémoire sensorielle auditive en utilisant un deuxième outil, le rehaussement auditif.

Le rehaussement se produit lorsque l'audibilité d'un composant cible donné dans un complexe de sinusoïdes est augmentée par l'exposition à ce même complexe dans lequel le composant cible est absent. En d'autres termes, c'est l'effet de la perception du premier accord qui modifiera la perception du deuxième accord. La trace mnésique du premier accord aura une influence sur le traitement du deuxième accord. Deux types de rehaussement peuvent être dissociés : le rehaussement d'intensité, où l'intensité du composant cible est variée entre les deux accords, et le rehaussement de fréquence, où la fréquence du composant cible est variée entre les deux accords. Ces

deux types de rehaussement produisent la même sensation, à savoir, une perception du composant cible plus saillante que les autres composants. Une expérience destinée à mieux comprendre les mécanismes des deux types de rehaussement a été menée, de façon à clarifier le matériel utilisé dans la suite du travail de thèse. Ses résultats, ainsi que ceux d'études parues plus récemment ont confirmé que des mécanismes différents étaient à la base du rehaussement d'intensité et du rehaussement de fréquence. Le rehaussement d'intensité serait induit par un phénomène d'adaptation neuronale, quand les FSD («Frequency Shift Detectors» ou Détecteurs automatiques de fréquence, Demany et Ramos, 2005) pourraient être à l'origine du rehaussement de fréquence. Il semble également clair que les mécanismes sous tendant le rehaussement, qu'il soit de fréquence ou d'intensité, sont des mécanismes plutôt centraux. La troisième étude de ce travail de thèse avait comme objectif de clarifier les relations entre perception et mémoire auditives, mais aussi d'affiner la nature du «trouble» du traitement auditif observé chez les adultes porteurs d'autisme dans la première expérience. Pour cela, du rehaussement de fréquence a été utilisé, dans la mesure où son origine pourrait se situer dans l'activation des FSD. Or, les personnes porteuses d'autisme pourraient bénéficier de FSD plus performants que ceux de personnes neurotypiques. Le rehaussement de fréquence se produit lors de l'écoute successive de deux accords de sons purs. Une manière d'étudier la mémoire auditive est d'observer les performances de participants dans une tâche de comparaison de deux stimuli séparés par un délai variable. Dans cette expérience, deux

conditions de mémoire ont été conçues, l'une où les deux accords sont strictement successifs, la seconde, où un délai de 500 ms sépare les deux accords. Une troisième condition sans rehaussement (répétition du même accord) a été réalisée. Cette troisième condition a servi de condition contrôle afin d'objectiver le rehaussement, mais également de condition de perception, dans la mesure où, sans élément saillant, seule la dissociation des éléments de l'accord permettait de réaliser la tâche. L'analyse des résultats a montré que tous les adultes (porteurs d'autisme et neurotypiques) obtenaient des performances similaires. De même, tous les enfants (porteurs d'autisme et neurotypiques) ont obtenu des performances similaires. Pour tous les participants, la condition avec rehaussement lorsque le délai entre les accords est court est mieux réussie que la condition avec rehaussement lorsque le délai entre les accords est long, cette dernière étant mieux réussie que la condition sans rehaussement. L'effet du délai a donc eu le même effet que le participant soit porteur d'autisme ou neurotypique. La mémoire auditive est donc préservée chez les adultes porteurs d'autisme.

Les résultats conjugués des deux études incluant une population de participants porteurs d'autisme vont dans le sens d'une dissociation entre les deux grandes fonctions cognitives que sont la perception auditive et la mémoire auditive.

Le premier argument en faveur d'un «trouble perceptif» provient des différentes formes de mémoire étudiées dans la deuxième expérience. En effet, l'effet de rehaussement en lui-même fait intervenir une forme de mémoire

sensorielle auditive implicite dans la mesure où l'écoute du premier accord modifie la perception du second. Une seconde forme de mémoire intervient lorsque le délai entre la présentation des accords est allongé (500 ms). Dans ces deux conditions, les participants porteurs d'autisme obtiennent des performances similaires à celles des participants neurotypiques, suggérant que la mémoire sensorielle auditive est intacte chez les participants porteurs d'autisme.

Le deuxième argument est issu de la différence entre les stimuli de chacune des deux expériences. Les stimuli de la première expérience sont spectralement très complexes (les bruits blancs sont constitués de toutes les fréquences), mais également temporellement complexes (ils sont très variables dans le temps). Les stimuli de la dernière expérience sont des accords de sons purs, spectralement complexes, mais statiques dans le temps, temporellement simples. Ainsi, seuls les stimuli de la première expérience présentent un aspect temporel complexe, et c'est justement dans la première expérience qu'un trouble développemental a été observé. Une explication potentielle de ce trouble perceptif lié à la complexité temporelle pourrait résider dans le développement cérébral des personnes porteuses d'autisme. Des études (Courchesne et al. 2001 ; 2005 ; 2007 ; 2011) ont observé un surdéveloppement précoce du cerveau chez des personnes porteuses d'autisme, affectant principalement les lobes frontaux et temporaux (le lobe occipital étant affecté de manière moindre). Ce surdéveloppement se produit très tôt dans la vie postnatale et est suivi d'un ralentissement voire même parfois d'un arrêt de

la croissance durant l'enfance. Alors que le cerveau neurotypique continue de grossir durant l'adolescence, le cerveau des personnes porteuses d'autisme atteint sa taille définitive vers approximativement 3 à 5 ans. Des études d'IRM ont également montré une dégénération progressive du cerveau des personnes porteuses d'autisme entre l'enfance et l'âge adulte (bien que cela n'aie pas été observé dans toutes les études, voir Courchesne et al. 2007 pour une revue). Ces observations anatomiques sont vraisemblablement liées aux observations psychophysiques révélées par nos études. Toutefois, les enfants porteurs d'autisme auraient dû également présenter un trouble par rapport aux enfants neurotypiques, ce qui n'a jamais été le cas dans nos études.

Les stimuli simples, perçus normalement, voire mieux par les personnes porteuses d'autisme que par les personnes neurotypiques sont traités dans le cortex auditif primaire (et particulièrement dans le gyrus de Heschl). En revanche, les stimuli plus complexes sont traités d'une part par le cortex auditif primaire, mais également par le cortex auditif secondaire, voire les aires associatives (Wessinger 2001). D'après Belmonte et al. (2004), le cerveau des personnes porteuses d'autisme présente un développement anormal des connexions nerveuses. Plus précisément, Just et al. (2004) ont observé qu'une très grande connectivité locale (à l'échelle d'une structure) se développait en parallèle d'une connectivité à grande échelle (entre différentes régions du cerveau) bien moindre. Cela pourrait être dû à une mauvaise élimination des synapses lors de la solidification des connexions avec le développement cérébral (Sporns et al., 2000). Dans la mesure où le trouble que nous avons

observé est présent uniquement lors du traitement de sons temporellement complexes, peut-être que les connexions permettant le traitement de la complexité spatiale sont conservées, alors que les connexions permettant le traitement de la complexité temporelle sont altérées par le phénomène mis en évidence par Sporns et al. (2000).

Ainsi, la mémoire sensorielle auditive semble préservée chez les personnes porteuses d'autisme, alors que leur traitement de l'aspect temporel des sons semble altéré à l'âge adulte. Deux mécanismes différents semblent régir les deux grandes fonctions cognitives que sont la perception auditive et la mémoire auditive, qui seraient donc dissociées.

La perception et la mémoire ont toujours été considérées comme deux fonctions totalement dissociées (voir par exemple Squire 2009). Déjà à la fin du XIXème siècle, Freud pensait que la mémoire et la perception étaient totalement dissociées, la perception appartenant au Conscient, et la mémoire au Préconscient et à l'Inconscient. De même, la perception et la mémoire étaient réalisées par deux types de neurones différents. Notons que les travaux de Freud sont contemporains de ceux d'Ebbinghaus, ce dernier étant le pionnier des travaux sur la mémoire. Les connaissances sur la mémoire étaient donc quasiment nulles à l'époque où Freud a commencé à écrire sur la mémoire. Si l'on sait maintenant qu'un même type de neurones fait transiter

les informations sensorielles et mnésiques au sein des différentes structures cérébrales, l'idée d'un encodage sensoriel était particulièrement visionnaire.

Où se situe la frontière entre perception et mémoire auditive ? Intuitivement, une relation sérielle paraît unir les deux fonctions. En effet, il semble difficile d'imaginer que l'on puisse mémoriser quelque chose que l'on n'a pas encore perçu. Pourtant, comme cela a déjà été mentionné précédemment, la perception d'un bruit blanc peut être modifiée par la mémoire auditive. Lors de l'écoute d'un tel bruit, un son statique, lisse, sans caractéristique particulière est perçu. En revanche, lorsqu'un segment de ce même bruit est prélevé et répété, des caractéristiques de ce bruit vont devenir perceptibles. On peut alors dire que les événements perceptuels en question sont une création de la mémoire, dans la mesure où ils n'existaient pas en l'absence de répétitions.

Comme cela a été mentionné dans l'introduction, le caractère transdisciplinaire des sciences cognitives permet d'aborder un sujet d'étude sous l'angle de différentes disciplines afin d'en obtenir une connaissance plus complète.

Dans une vision modulaire de la psychologie cognitive, le cerveau serait constitué de différents modules spécialisés dans une fonction cognitive bien particulière. Ainsi, il est admis que l'intégrité du lobe médial temporal (LMT) est indispensable au bon fonctionnement de la mémoire (Milner et al. 1998). Constitué de l'hippocampe et des cortex entorhinal, périrhinal et

parahippocampique, le LMT joue un rôle prépondérant dans la mémoire à long terme déclarative (Squire 2004). Pourtant, plusieurs études ont observé une implication du cortex périrhinal (une des structures du LMT) à la fois dans la mémoire déclarative, mais également dans des tâches de discrimination visuelles (Bussey et Saksida, 2007 ; O’Neil et al. 2009). Si une telle structure permet de réaliser deux tâches aussi différentes qu’une tâche de mémoire et une tâche de perception, les mécanismes sous-tendant les deux fonctions cognitives ne sont peut-être pas aussi dissociables que l’on pourrait penser. En ce qui concerne le domaine de l’audition, si les voies perceptives sont plutôt bien localisées, le siège de la mémoire auditive n’est pas clairement identifié. Sans pour autant affirmer qu’il est impossible de dissocier perception et mémoire, il est indispensable de repenser les relations que peuvent entretenir ces deux fonctions et dont la localisation cérébrale peut être commune.

Table des figures

2.1	Bruit blanc périodique	37
3.1	Protocole expérimental de l'expérience 1	56
3.2	Expérience 1 : Age vs. Type de tâche	58
3.3	Expérience 1 : Age vs. Clinique	60
3.4	Expérience 1 : Age vs. Clinique pour la tâche de mémoire . . .	61
3.5	Expérience 1 : Age vs. Clinique pour la tâche de perception . .	62
4.1	Rehaussement d'intensité	82
4.2	Rehaussement de fréquence	83
4.3	Expérience 2 : Exemples de séquences de stimuli	93
4.4	Expérience 2 : Type de rehaussement vs. Interférence	95
4.5	Expérience 2 : Type de rehaussement vs. Mode de présentation (Performances moyennes)	101
4.6	Expérience 2 : Type de rehaussement vs. Mode de présentation	102
5.1	Expérience 3 : Protocole expérimental	124

5.2	Expérience 3 : Performances moyennes pour chaque condition	127
5.3	Expérience 3 : Age vs. Condition	128

Bibliographie

- [1] Agus, T. R., Thorpe, S. J. & Pressnitzer, D. (2010) Rapid formation of robust auditory memories : insights from noise. *Neuron*, v 66(4) :p. 610–618
- [2] Alcantara, J. I., Cope, T. E., Cope, W. & Weisblatt, E. J. (2012) Auditory temporal-envelope processing in high-functioning children with Autism Spectrum Disorder. *Neuropsychologia*, v 50(7) :p. 1235–1251
- [3] Alcantara, J. I., Weisblatt, E. J., Moore, B. C. & Bolton, P. F. (2004) Speech-in-noise perception in high-functioning individuals with autism or Asperger’s syndrome. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, v 45(6) :p. 1107–1114
- [4] American Psychiatric Association (2002), DSM-IV-TR, Manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux (2002), Elsevier Masson, Paris
- [5] American Psychiatric Association (2013), DSM-5, Diagnostic and statistical manual of mental disorders (5e ed.) (2013), Washington, DC : American Psychiatric Publishing
- [6] Andler, D. (2004), Introduction aux sciences cognitives (2004), Folio Essais
- [7] Aristote (1999), Histoire des animaux, Livre IV, Chapitre 9 (1999), Belles Lettres, Universités de France

- [8] Atkinson, R. & Shiffrin, R., Human memory : A proposed system and its control processes (1968), *The Psychology of Learning and Motivation : Advances in Research and Theory*, v 2. New York, Academic Press, in K. Spence and J. Spence (dir.), p. 89–195
- [9] Belmonte, M. K., Allen, G., Beckel-Mitchener, A., Boulanger, L. M., Carper, R. A. & Webb, S. J. (2004) Autism and abnormal development of brain connectivity. *Journal of Neuroscience*, v 24(42) :p. 9228–9231
- [10] Bonnel, A., McAdams, S., Smith, B., Berthiaume, C., Bertone, A., Ciocca, V., Burack, J. A. & Mottron, L. (2010) Enhanced pure-tone pitch discrimination among persons with autism but not Asperger syndrome. *Neuropsychologia*, v 48(9) :p. 2465–2475
- [11] Bonnel, A., Mottron, L., Peretz, I., Trudel, M., Gallun, E. & Bonnel, A. M. (2003) Enhanced pitch sensitivity in individuals with autism : a signal detection analysis. *Journal of Cognitive Neuroscience*, v 15(2) :p. 226–235
- [12] Broca, P. (1861) Perte de la parole, ramollissement chronique et destruction partielle du lobe antérieur gauche du cerveau. *Bulletin de la Société Anthropologique*, v 2 :p. 235–238
- [13] Broca, P. (1861) Remarques sur le siège de la faculté du langage articulé, suivies d’une observation d’aphémie (perte de la parole). *Bulletin de la Société Anatomique*, v 6 :p. 330–357
- [14] Buss, E., Hall, J. W., Grose, J. H. & Dev, M. B. (1999) Development of adult-like performance in backward, simultaneous, and forward masking. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, v 42(4) :p. 844–849
- [15] Bussey, T. J. & Saksida, L. M. (2007) Memory, perception, and the ventral visual-perirhinal-hippocampal stream : thinking outside of the boxes. *Hippocampus*, v 17(9) :p. 898–908
- [16] Byrne, A. J., Stellmack, M. A. & Viemeister, N. F. (2011) The enhancement effect : evidence for adaptation of inhibition using a

- binaural centering task. *Journal of Acoustical Society of America*, v 129(4) :p. 2088–2094
- [17] Carcagno, S., Semal, C. & Demany, L. (2011) Frequency-shift detectors bind binaural as well as monaural frequency representations. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, v 37(6) :p. 1976–1987
- [18] Cattell McKeen, J. (1890) Mental tests and measurements. *Mind*, v 15 :p. 373–381
- [19] Clement, S., Demany, L. & Semal, C. (1999) Memory for pitch versus memory for loudness. *Journal of Acoustical Society of America*, v 106(5) :p. 2805–2811
- [20] Courchesne, E., 1Karns, C. M., Davis, H. R., Ziccardi, R., Carper, R. A., Tigue, Z. D., Chisum, H. J., Moses, P., Pierce, K., Lord, C., Lincoln, A. J., Pizzo, S., Schreibman, L., Haas, R. H., Akshoomoff, N. A. & Courchesne, R. Y. (2001) Unusual brain growth patterns in early life in patients with autistic disorder : an MRI study. *Neurology*, v 57(2) :p. 245–254
- [21] Courchesne, E., 2Redcay, E., Morgan, J. T. & Kennedy, D. P. (2005) Autism at the beginning : microstructural and growth abnormalities underlying the cognitive and behavioral phenotype of autism. *Development and Psychopathology.*, v 17(3) :p. 577–597
- [22] Courchesne, E., 3Pierce, K., Schumann, C. M., Redcay, E., Buckwalter, J. A., Kennedy, D. P. & Morgan, J. (2007) Mapping early brain development in autism. *Neuron*, v 56(2) :p. 399–413
- [23] Courchesne, E., 4Mouton, P. R., Calhoun, M. E., Semendeferi, K., Ahrens-Barbeau, C., Hallet, M. J., Barnes, C. C. & Pierce, K. (2011) Neuron number and size in prefrontal cortex of children with autism. *Journal of the American Medical Association*, v 306(18) :p. 2001–2010

- [24] Cowan, N. (1984) On short and long auditory stores. *Psychological Bulletin*, v 96 :p. 341–370
- [25] Craik, F. I. M. & Lockhart, R. S. (1972) Levels of processing : A framework for memory research. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, v 6 :p. 671–684
- [26] Dawes, P. & Bishop, D. V. (2008) Maturation of visual and auditory temporal processing in school-aged children. *Journal of Autism and Developmental Disorder*, v 51(4) :p. 1002–1015
- [27] Demany, L. & Ramos, C. (2005) On the binding of successive sounds : perceiving shifts in nonperceived pitches. *Journal of Acoustical Society of America*, v 117(2) :p. 833–841
- [28] Demany, L. & Semal, C., The role of memory in auditory perception (2008), *Springer Handbook of Auditory Research*, v 29. Springer
- [29] Demany, L., Pressnitzer, D. & Semal, C. (2009) Tuning properties of the auditory frequency-shift detectors. *Journal of Acoustical Society of America*, v 126(3) :p. 1342–1348
- [30] Demany, L., Semal, C. & Pressnitzer, D. (2011) Implicit versus explicit frequency comparisons : two mechanisms of auditory change detection. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception*, v 37(2) :p. 597–605
- [31] Demany, L., Carcagno, S. & Semal, C. (2013) The perceptual enhancement of tones by frequency shifts. *Hearing Research*, v 298 :p. 10–16
- [32] DePape, A. M., Hall, G. B., Tillmann, B. & Trainor, L. J. (2012) Auditory processing in high-functioning adolescents with Autism Spectrum Disorder. *PLoS ONE*, v 7(9) :p. e44084
- [33] Deutsch, D. (1975) Auditory memory. *Canadian Journal of Psychology*, v 29(2) :p. 87–105

- [34] Durlach, N. I. & Braida, L. D. (1969) Intensity perception. I. Preliminary theory of intensity resolution. *Journal of Acoustical Society of America*, v 46(2) :p. 372–383
- [35] Ebbinghaus, H. (1885), *Über das Gedächtnis* (1885), Leipzig
- [36] Erviti, M., Semal, C. & Demany, L. (2011) Enhancing a tone by shifting its frequency or intensity. *Journal of Acoustical Society of America*, v 129(6) :p. 3837–3845
- [37] Fechner, G. T. (1860), *Elemente der psychophysik* (1860), Leipzig
- [38] Galton, F. (1880) Statistics of mental imagery. *Mind*, v 5 :p. 301–318
- [39] Glass, E., Sachse, S. & von Suchodoletz, W. (2008) Development of auditory sensory memory from 2 to 6 years : an MMN study. *Journal of Neural Transmission*, v 115(8) :p. 1221–1229
- [40] Gomes, H., Sussman, E., Ritter, W., Kurtzberg, D., Cowan, N. & Vaughan, H. G. (1999) Electrophysiological evidence of developmental changes in the duration of auditory sensory memory. *Developmental Psychology*, v 35(1) :p. 294–302
- [41] Gomot, M., Belmonte, M. K., Bullmore, E. T., Bernard, F. A. & Baron-Cohen, S. (2008) Brain hyper-reactivity to auditory novel targets in children with high-functioning autism. *Brain*, v 131(9) :p. 2479–2488
- [42] Green, D. M. & Swets, J. A. (1974), *Signal Detection Theory and Psychophysics* (1974), Krieger Publishing Company
- [43] Groen, W. B., van Orsouw, L., Huurne, N., Swinkels, S., van der Gaag, R. J., Buitelaar, J. K. & Zwiers, M. P. (2009) Intact spectral but abnormal temporal processing of auditory stimuli in autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, v 39(5) :p. 742–750
- [44] Guttman, N. & Julesz, B. (1963) Lower limits of auditory periodicity analysis. . *Journal of Acoustical Society of America*, v 35 :p. 610
- [45] Haesen, B., Boets, B. & Wagemans, J. (2012) A review of behavioural and electrophysiological studies on auditory processing and speech

- perception in autism spectrum disorders. *Research on Autism Spectrum Disorder*, v 5(2) :p. 701–714
- [46] Heaton, P. (1998) Pitch perception in children with autistic spectrum disorders. *British Journal of Developmental Psychology*, v 23(4) :p. 543–558
- [47] Heaton, P. (2003) Pitch memory, labelling and disembedding in autism. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, v 44(4) :p. 543–551
- [48] Heaton, P. (2005) Interval and contour processing in autism. *Journal of Autism and Developmental Disorder*, v 35(6) :p. 787–793
- [49] Heaton, P., Williams, K., Cummins, O. & Happe, F. (2008) Autism and pitch processing splinter skills : a group and subgroup analysis. *Autism*, v 12(2) :p. 203–219
- [50] Holdnack, J., Goldstein, G. & Drozdick, L. (2011) Social perception and WAIS-IV Performance in adolescents and adults diagnosed with Asperger’s Syndrome and Autism. *Assessment*, v 18(2) :p. 192–200
- [51] Howitt, D. & Cramer, D. (2008), introduction to statistics 4th edition (2008), Pearson
- [52] Jones, C. R., Happe, F., Baird, G., Simonoff, E., Marsden, A. J., Tregay, J., Phillips, R. J., Goswami, U., Thomson, J. M. & Charman, T. (2009) Auditory discrimination and auditory sensory behaviours in autism spectrum disorders. *Neuropsychologia*, v 47(13) :p. 2850–2858
- [53] Just, M. A., Cherkassky, V. L., Keller, T. A. & Minshew, N. J. (2004) Cortical activation and synchronization during sentence comprehension in high-functioning autism : evidence of underconnectivity. *Brain*, v 127(8) :p. 1811–1821
- [54] Kaernbach, C. (1990) A single-interval adjustment-matrix (SIAM) procedure for unbiased adaptive testing. *Journal of Acoustical Society of America*, v 88(6) :p. 2645–2655

- [55] Kaernbach, C. (1991) Simple adaptive testing with the weighted up-down method. *Perception & Psychophysics*, v 49(3) :p. 227–229
- [56] Kaernbach, C. (1992) On the consistency of tapping to repeated noise. *Journal of Acoustical Society of America*, v 92(2) :p. 788–793
- [57] Kaernbach, C. (2004) The memory of noise. *Experimental Psychology*, v 51(4) :p. 240–248
- [58] Kahneman, D. (1973), *Attention and Effort* (1973), Prentice Hall
- [59] Kern, J. K., Trivedi, M. H., Garver, C. R., Grannemann, B. D., Andrews, A. A., Savla, J. S., Johnson, D. G., Mehta, J. A. & Schroeder, J. L. (2006) The pattern of sensory processing abnormalities in autism. *Autism*, v 10(5) :p. 480–494
- [60] Khalfa, S., Bruneau, N., Roge, B., Georgieff, N., Veuillet, E., Adrien, J. L., Barthelemy, C. & Collet, L. (2004) Increased perception of loudness in autism. *Hearing Research*, v 198(1-2) :p. 87–92
- [61] Liberman, A. M., Cooper, F. S., Shankweiler, D. P. & Studdert-Kennedy, M. (1967) Perception of the speech code. *Psychological Review*, v 74(6) :p. 431–461
- [62] Milner, B. (1959) The memory defect in bilateral hippocampal lesions. *Psychiatric Research Reports*, v 11 :p. 43–52
- [63] Milner, B., Squire, L. R. & Kandel, E. R. (1998) Cognitive neuroscience and the study of memory. *Neuron*, v 20(3) :p. 445–468
- [64] Mottron, L. & Burack, J. (2001), Enhanced perceptual functioning in the development of autism (2001), In Burack J. A., Charman T., Yirmiya N., Zelazo P. R., (Eds). *The development of autism : Perspectives from theory and research*. Erlbaum, Mahwah, NJ
- [65] Mottron, L., Dawson, M., Soulieres, I., Hubert, B. & Burack, J. (2006) Enhanced perceptual functioning in autism : an update, and eight principles of autistic perception. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, v 36(1) :p. 27–43

- [66] Nelson, P. C. & Young, E. D. (2010) Neural correlates of context-dependent perceptual enhancement in the inferior colliculus. *The Journal of Neuroscience*, v 30 :p. 6577–6587
- [67] O’Neil, E. B., Cate, A. D. & Kohler, S. (2009) Perirhinal cortex contributes to accuracy in recognition memory and perceptual discriminations. *Journal of Neuroscience*, v 29(26) :p. 8329–8334
- [68] O’Riordan, M. & Passetti, F. (2006) Discrimination in autism within different sensory modalities. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, v 36(5) :p. 665–675
- [69] Palmer, A. R., Summerfield, Q. & Fantini, D. A. (1995) Responses of auditory nerve fibres to stimuli producing psychophysical enhancement. *Journal of Acoustical Society of America*, v 97 :p. 1786–1799
- [70] Platon (1995), Théétète (1995), trad., intro. et notes par M. Narcy, Paris, GF-Flammarion, 2ème éd. corrigée
- [71] Samson, F., Hyde, K. L., Bertone, A., Soulieres, I., Mendrek, A., Ahad, P., Mottron, L. & Zeffiro, T. A. (2011) Atypical processing of auditory temporal complexity in autistics. *Neuropsychologia*, v 49(3) :p. 546–555
- [72] Samson, F., Mottron, L., Jemel, B., Belin, P. & Ciocca, V. (2006) Can spectro-temporal complexity explain the autistic pattern of performance on auditory tasks? *Journal of Autism and Developmental Disorder*, v 36(1) :p. 65–76
- [73] Semal, C. & Demany, L. (1991) Dissociation of pitch from timbre in auditory short-term memory. *Journal of Acoustical Society of America*, v 89(5) :p. 2404–2410
- [74] Semal, C. & Demany, L. (1993) Further evidence for an autonomous processing of pitch in auditory short-term memory. *Journal of Acoustical Society of America*, v 94(3) :p. 1315–1322

- [75] Semal, C. & Demany, L. (2006) Individual differences in the sensitivity to pitch direction. *Journal of Acoustical Society of America*, v 120(6) :p. 3907–3915
- [76] Semal, C., Demany, L., Ueda, K. & Halle, P. A. (1996) Speech versus nonspeech in pitch memory. *Journal of Acoustical Society of America*, v 100(2) :p. 1132–1140
- [77] Serman, M., Semal, C. & Demany, L. (2008) Enhancement, adaptation, and the binaural system. *Journal of Acoustical Society of America*, v 123(6) :p. 4412–4420
- [78] Shallice, T. & Warrington, E. K. (1970) Independent functioning of verbal memory stores : a neuropsychological study. *Quarterly Journal of Experimental Psychology B*, v 22(2) :p. 261–273
- [79] Squire, L. R. (2004) Memory systems of the brain : a brief history and current perspective. *Neurobiology of Learning and Memory*, v 82(3) :p. 171–177
- [80] Squire, L. R. (2009) Memory and brain systems : 1969–2009. *Journal of Neuroscience*, v 29(41) :p. 12711–12716
- [81] Stanutz, S., Wapnick, J. & Burack, J. (2012) Pitch discrimination and melodic memory in children with autism spectrum disorder. *Autism*
- [82] Summerfield, Q., Sidwell, A. & Nelson, T. (1987) Auditory enhancement of changes in spectral amplitude. *Journal of Acoustical Society of America*, v 81(3) :p. 700–708
- [83] Tomchek, S. D. & Dunn, W. (2007) Sensory processing in children with and without autism : a comparative study using the short sensory profile. *American Journal of Occupational Therapy*, v 61(2) :p. 190–200
- [84] Tsai, L. Y. (1992) Is Rett syndrome a subtype of pervasive developmental disorders? *Journal of Autism and Developmental Disorder*, v 22(4) :p. 551–561

-
- [85] Tulving, E. (1995), Organization of memory : quo vadis? (1995), In : Gazzaniga MS, ed. The cognitive neurosciences. Cambridge : The MIT Press
- [86] Van Noorden, L. P. A. S. (1975) Temporal coherence in the perception of tone sequence (Doctoral Dissertation. *Technische Hogeschool, Eindhoven, The Netherlands*
- [87] Viemeister, N. F., Adaptation of masking (1980). Psychophysical, Physiological and Behavioural Studies in Hearing. p. 190–199
- [88] Viemeister, N. F. & Bacon, S. P. (1982) Forward masking by enhanced components in harmonic complexes. *Journal of Acoustical Society of America*, v 71(6) :p. 1502–1507
- [89] Warren, R. M., Bashford, J. A., Cooley, J. M. & Brubaker, B. S. (2001) Detection of acoustic repetition for very long stochastic patterns. *Perception and Psychophysics*, v 63(1) :p. 175–182
- [90] Watling, R. L., Deitz, J. & White, O. (2001) Comparison of Sensory Profile scores of young children with and without autism spectrum disorders. *American Journal of Occupational Therapy*, v 55(4) :p. 416–423
- [91] Wechsler, D. (2000), WAIS-III Echelle d'intelligence de Wechsler pour adultes - Troisième Edition (2000), ECPA
- [92] Wechsler, D. (2005), WISC-IV Echelle d'intelligence de Wechsler pour enfants - Quatrième Edition (2005), ECPA
- [93] Werner, L. A. (1999) Forward masking among infant and adult listeners. *Journal of Acoustical Society of America*, v 105(4) :p. 2445–2453
- [94] Werner, L. A., Human auditory development (2007). The senses : a comprehensive reference. Elsevier
- [95] Wessinger, C. M., VanMeter, J., Tian, B., Van Lare, J., Pekar, J. & Rauschecker, J. P. (2001) Hierarchical organization of the human
-

- auditory cortex revealed by functional magnetic resonance imaging. *Journal of Cognitive Neuroscience*, v 13(1) :p. 1–7
- [96] Wickelgren, W. A. (1969) Associative strength theory of recognition memory for pitch. *Journal of Mathematical Psychology*, v 6 :p. 13–61
- [97] Wightman, F., Allen, P., Dolan, T., Kistler, D. & Jamieson, D. (1989) Temporal resolution in children. *Child Development*, v 60(3) :p. 611–624
- [98] Wright, B. A. & Zecker, S. G. (2004) Learning problems, delayed development, and puberty. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v 101(26) :p. 9942–9946