

Université de Montréal

**TRAITEMENT VOCAL & VIEILLISSEMENT NORMAL :
APPORTS COMPORTEMENTAUX & NEUROFONCTIONNELS**

par

Guylaine Bélizaire

Département de Psychologie

Faculté des Arts et Sciences

Thèse présentée à la Faculté des Études Supérieures et Postdoctorales
en vue de l'obtention du grade de *Philosophiæ doctor* (Ph.D.) en Psychologie
Profil recherche et intervention - Option Neuropsychologie Clinique

Juillet 2014

© Guylaine Bélizaire, 2014

Cette thèse intitulée :

Traitement vocal et vieillissement normal :
Apports comportementaux et neurofonctionnels

Présentée par :

Guylaine Bélizaire

A été évaluée par un jury composé des personnes suivantes :

Président rapporteur : Julien Doyon

Directeur de recherche : Yves Joanette

Co-directeur de recherche : Pascal Belin

Examineur interne : Tony Leroux

Examineur externe : Claude Alain

Représentant du doyen de la FES : Julien Doyon

RÉSUMÉ

La voix est tout sauf un stimulus auditif ordinaire. Pour cause, elle prend son importance de manière très précoce chez l'Homme lorsque, dans l'environnement amniotique, le fœtus entend pour la toute première fois la voix de sa mère. C'est en quelque sorte par l'intermédiaire de cette voix que les premiers contacts avec le monde extérieur, mais également avec l'Autre, s'effectuent. Le statut particulier de la voix humaine perdure au fil du développement, devenant plus tard le principal médium véhiculant le langage oral, si significatif pour l'Homme.

En parallèle, et de manière tout aussi adaptative, elle permet la transmission d'informations non langagières renseignant sur l'identité, l'état émotionnel mais également le statut social de chaque individu. C'est ainsi que simplement en entendant la voix d'une personne inconnue, il est généralement possible d'en extrapoler son âge, son genre, mais également d'avoir une idée assez précise de l'état émotionnel dans lequel elle se trouve. Les capacités permettant d'extraire de la voix les divers éléments informationnels qu'elle contient ne seraient toutefois pas stables au fil du temps. Ainsi, le vieillissement normal semble associé à des difficultés de traitement des informations vocales de nature langagière, mais également non langagière. De nombreuses études se sont intéressées au déclin des capacités de traitement du discours avec l'âge. Beaucoup moins de travaux ont cependant considéré les conséquences du vieillissement sur le domaine paralinguistique et, lorsque des travaux s'y sont attardés, c'est essentiellement la sphère affective qui a été investiguée. En raison de ce peu d'études, mais également de leur focus portant spécifiquement sur la sphère émotionnelle, il est extrêmement ardu de généraliser les résultats obtenus au traitement vocal général. La présente thèse s'est donc intéressée aux capacités de traitement de la voix dans le vieillissement normal.

La première étude de cette thèse (Article 1) avait pour objectif d'évaluer l'impact du vieillissement normal sur les capacités comportementales de traitement paralinguistique vocal non émotionnel. Pour ce faire, une batterie informatisée composée de quatre tâches a été élaborée : la batterie d'évaluation de la perception vocale (Batterie EPV; tâches de catégorisation de genre, de discrimination de sources sonores, adaptative de discrimination et de mémorisation). Cette batterie permettait de comparer les performances d'adultes jeunes et âgés lors du traitement de stimuli vocaux et non vocaux, mais également lors du traitement de divers

stimuli vocaux. Cette première étude met en évidence, pour trois des quatre tâches comportementales, des performances inférieures chez les adultes âgés et ce, malgré le contrôle statistique des contributions du déclin auditif et cognitif. Pour les aînés, le traitement de stimuli vocaux, en comparaison au traitement de stimuli non vocaux, n'était toutefois pas systématiquement inférieur à celui des jeunes adultes. Sans que les performances ne puissent être prédites par la mesure cognitive utilisée comme covariable (performances à un test de dépistage de troubles cognitifs), il appert que les demandes cognitives inhérentes aux tâches participent à ces différences intergroupes.

Le second article de ce travail visait quant à lui à explorer à l'aide de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), l'influence du vieillissement normal sur les réseaux neuronaux sous-tendant le traitement de l'information vocale, une telle investigation n'ayant jamais été effectuée auparavant. Pour ce faire, une tâche d'écoute passive (permettant le contraste de blocs de sons vocaux et non vocaux) ainsi qu'une tâche adaptative de discrimination ont été utilisées. La tâche adaptative, inspirée d'un protocole psycho-acoustique « up-down », assurait pour l'ensemble des participants, l'obtention de niveau de performance équivalent, une condition nécessaire à la comparaison intergroupe au niveau neurofonctionnel. La comparaison des adultes jeunes et âgés n'a mis en évidence aucune disparité quant au recrutement des aires répondant préférentiellement à la voix : les aires vocales temporales (AVT). Ce résultat suggère que l'âge n'affecte pas la mobilisation des aires spécialisées dans le traitement de la voix. Néanmoins, à l'extérieur des AVT et chez les aînés, le sous recrutement d'une portion du cortex auditif a été observé, en parallèle au recrutement additionnel de régions pariétale, temporale et frontale (Article 2 – Étude 1). Lors de la réalisation d'une tâche adaptative de discrimination, contrairement à ce qui était attendu, les seuils de discrimination des deux groupes d'âges étaient comparables. Pour effectuer la tâche, les participants âgés ont cependant recruté un réseau neuronal plus étendu que celui des jeunes adultes, et pour les aînés, l'activation additionnelle de régions frontale et temporale sous-tendaient la réalisation de la tâche (Article 2 - Étude 2).

Les données comportementales présentées dans cette thèse suggèrent que l'effet délétère que semble avoir le vieillissement normal sur les capacités de traitement paralinguistique vocal affectif est également retrouvé lors du traitement d'informations vocales

émotionnellement neutres. En parallèle, la mise en place de phénomènes de plasticité cérébrale est objectivée. Ces derniers ne toucheraient cependant pas les réseaux spécialisés dans le traitement de la voix, qui seraient recrutés de manière comparable par les adultes jeunes et âgés. Néanmoins, la tâche d'écoute passive a mis en évidence la présence, chez les aînés, d'un recrutement sous-optimal d'une portion du cortex auditif (gyrus temporal transverse). En outre, et ce pour les deux tâches, des réseaux neuronaux surnuméraires étaient sollicités par les adultes âgés, ce qui leur aurait potentiellement permis d'assurer le maintien de performances adéquates.

Mots-clés : voix, vieillissement normal, traitement paralinguistique, plasticité cérébrale, imagerie cérébrale, compensation neurofonctionnelle

ABSTRACT

Amongst all the sounds present in our environment, the human voice is probably the most significant one. Indeed, not only does voice convey oral language, but it also passes on a wide array of paralinguistic information characterising each individual. In fact, simply by hearing a voice, we are generally able to determine the age, identity, social status but also the mood in which the speaker is at the moment. However, during normal aging, the processing of the information contained in voice, may it be linguistic or not, appears to become more difficult. In the paralinguistic domain, the deleterious effects of normal aging were mainly explored via affective prosody. It is thus quite difficult to generalize those results to the processing of vocal information in general. In addition, cerebral reorganization accompanying normal aging was characterized for speech perception, but the effects of age on the cerebral processing of paralinguistic vocal information still remain unclear. The main purpose of this work was to palliate to this shortcoming.

The first study presented in this thesis (Article 1) evaluated the impact of normal aging on the behavioral processing of non affective paralinguistic vocal information by comparing the performances of young and older adults. To do so, a computerized battery was created: the Voice Perception Assessment battery, which comprised four behavioral tasks (VPA battery; gender categorization task, auditory source discrimination task, adaptive discrimination task and memory task). The tasks created allowed the comparison of vocal and non vocal processing, as well as the comparison of the processing of different types of vocal stimuli. Our results indicate that, while controlling for cognitive and auditory decline, older adults were less efficient than younger participants for three of the four VPA tasks. However, a systematic age-related decline for vocal processing was not observed. The task performances could not be predicted by the cognitive measure selected as a control variable (MoCA scores). However, the disparities in task demands seem to explain a portion of the paralinguistic vocal processing age-related decline observed.

The main purpose of the second article was to empirically assess, using functional magnetic resonance imagery (fMRI), the impact of normal aging on the neural networks underlying the processing of human voice, as it has never been done yet. To do so, a passive listening task (contrasting vocal and non vocal blocks of sounds) and an adaptive discrimination

task were used. The adaptive task, based on a transformed up-down protocol, allowed us to insure equivalent performance levels in both age-groups, a necessary condition to neurofunctional group comparison. Our results indicate that young and older adults recruited similarly the cortical areas preferentially responding to voice, the Temporal Voice Areas (TVA). In parallel, outside the TVA, an age-related under recruitment of a portion of the auditory cortex was observed, as well as an over recruitment of parietal, temporal and frontal regions (Article 2 – Study 1). For the adaptive discrimination task, contrary to what was expected, the discrimination thresholds of both age-groups were similar. Nevertheless, to be able to perform the task, older adults needed to engage cortical regions in the temporal and frontal lobes that younger adults did not recruit (Article 2 – Study 2).

The behavioral data presented in this work suggest that normal aging can be associated with a decline of the capacity to process non affective paralinguistic vocal information. The observed age-related differences appear to be more salient when the cognitive demands of the task are high. In parallel, mechanisms of cerebral plasticity appear to take place as well. Those phenomena however do not seem to affect the way the cortical areas specialized in the processing of human voice are recruited, which remains the same between young and older adults. However, the passive listening task elicited an age-related under-recruitment for a portion of the auditory cortex (left transverse temporal gyrus). Both for the passive listening task and the adaptive discrimination task, an over-recruitment of additional networks were observed for older adults. This extended network could contribute to the preservation of adequate performance in older adults.

Keywords: voice, normal aging, paralinguistic processing, cerebral plasticity, neuroimaging, neurofunctional compensation

TABLE DES MATIÈRES

Résumé.....	iii
Abstract.....	vi
Table des matières.....	viii
Liste des tableaux.....	xi
Liste des figures.....	xii
Liste des sigles et abréviations.....	xiv
Remerciements.....	xx

CHAPITRE I : INTRODUCTION THÉORIQUE..... 1

1.1 Avant-propos.....	2
1.2 Traitement paralinguistique vocal & vieillissement normal : données empiriques.....	5
1.2.1 Introduction.....	5
1.2.2 Vieillissement normal & traitement paralinguistique vocal.....	6
1.3 Traitement paralinguistique vocal & vieillissement normal : hypothèses explicatives.....	15
1.3.1 Le déclin des capacités auditives.....	16
1.3.2 Le déclin des capacités cognitives.....	19
1.3.3 Les modifications cérébrales anatomophysiologiques & fonctionnelles.....	27
1.4 Aires cérébrales spécifiques au traitement vocal.....	42
1.4.1 Aires vocales temporales.....	42
1.4.2 Modélisation du traitement cérébral vocal.....	44
1.4.3 Vieillissement normal & aires vocales temporales.....	45

1.5 Problématiques & hypothèses.....	47
1.5.1 Vieillissement normal & traitement paralinguistique vocal : données comportementales.....	47
1.5.2 Vieillissement normal & traitement paralinguistique vocal : données de neuroimagerie	49
CHAPITRE II : MÉTHODOLOGIE ET RÉSULTATS	52
2.1 Premier article : Voice perception assessment : impact of normal aging on vocal processing.....	53
2.2 Second article : Cerebral voice processing & aging : a vocal case of neuroplasticity	86
CHAPITRE III : DISCUSSION GÉNÉRALE	118
3.1 Rappel des objectifs	119
3.2 Volet 1: Vieillissement normal & traitement paralinguistique vocal – apports comportementaux	119
3.2.1 Impact différentiel du vieillissement normal sur le traitement paralinguistique vocal	120
3.2.2 Différences jeunes-aînés : artéfact lié aux difficultés cognitives & auditives ou réel effet de l'âge?	122
3.2.3 Nature des stimuli.....	124
3.2.4 Synthèse.....	127

3.3 Volet 2: Vieillissement normal & traitement paralinguistique vocal – apports neurofonctionnels	128
3.3.1 Vieillissement normal & spécialisation vocale cérébrale	128
3.3.2 Discrimination paralinguistique vocale non affective : données comportementales	130
3.3.3 Discrimination paralinguistique vocale non affective : patrons d'activité cérébrale.....	133
3.3.4 Synthèse	135
3.4 Intégration des données de neuroimagerie	136
3.4.1 Patrons d'activation cérébrale distincts pour l'écoute passive & la tâche active.....	136
3.4.2 Réorganisation cérébrale fonctionnelle au cours du vieillissement normal : mise en place de stratégies différentes liées à l'expertise?	138
3.5 Limites & perspectives futures	142
3.5.1 Limites	143
3.5.2 Perspectives futures	145
3.6 Conclusion	147
CHAPITRE IV : BIBLIOGRAPHIE	149
CHAPITRE V : ANNEXES.....	xxii

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I: INTRODUCTION THÉORIQUE

Tableau 1: Définitions des principales fonctions cognitives22

CHAPITRE II - ARTICLE 1: VOICE PERCEPTION ASSESSMENT: IMPACT OF NORMAL AGING

Table 1: Young and older adults' demographic, cognitive and psychological characteristics..... 77

Table 2: Young and older adults' performance at the VPA tasks..... 78

CHAPITRE II - ARTICLE 2: CEREBRAL VOICE PROCESSING & AGING: A VOCAL CASE OF NEUROPLASTICITY

Table 1: Young and older adults' demographic, cognitive and psychological characteristics..... 113

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I: INTRODUCTION THÉORIQUE

<u>Figure 1</u> : Synthèse des différentes informations véhiculées par la voix humaine.....	3
<u>Figure 2</u> : Aires vocales temporales.....	43
<u>Figure 3</u> : Modélisation de la perception vocale.....	45

CHAPITRE II - ARTICLE 1: VOICE PERCEPTION ASSESSMENT: IMPACT OF NORMAL AGING

<u>Figure 1</u> : Voices and bells memory task	79
<u>Figure 2</u> : Vocal adaptive discrimination task	81
<u>Figure 3</u> : Auditory source discrimination task	83
<u>Figure 4</u> : Gender source categorization task	84

CHPITRE II - ARTICLE 2: CEREBRAL VOICE PROCESSING & AGING: A VOCAL CASE OF NEUROPLASTICITY

STUDY #1

<u>Figure 1</u> : Brain activity for the processing of vocal stimuli in young and older participants	114
<u>Figure 2</u> : Main effect of age for the functional voice area localizer.....	115
<u>Figure 3</u> : Negative effect of aging for the functional voice area localizer.....	116

STUDY #2

Figure 4: Behavioral performances for the auditory adaptive discrimination task117

Figure 5: Brain activity during non linguistic vocal discrimination, for the low and high performance conditions..... 118

Figure 6: Main effect of age for the adaptive discrimination task 119

LISTE DES PRINCIPAUX SIGLES & ABRÉVIATIONS – FRANÇAIS

ANOVA	Analyse de variance
ANCOVA	Analyse de covariance
AVC	Accident vasculaire cérébral
AVT	Aires vocales temporales
CPF	Cortex préfrontal
DT	Droit/Droite
EPV	Évaluation perceptuelle vocale
fo	Fréquence fondamentale
fo-M	Fréquences fondamentales moyennées
Ga	Gauche
GTT	Gyrus temporal transverse
HD	Hémisphère droit
HG	Hémisphère gauche
IRM	Imagerie par résonance magnétique
IRMf	Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle
NV	Non vocal
QI	Quotient intellectuel
STS	Sillon temporal supérieur
TCL	Trouble cognitif léger
TEP	Tomographie par émission de positrons
TNS-A	Trouble neurocognitif sévère dû à la maladie d'Alzheimer
V	Vocal

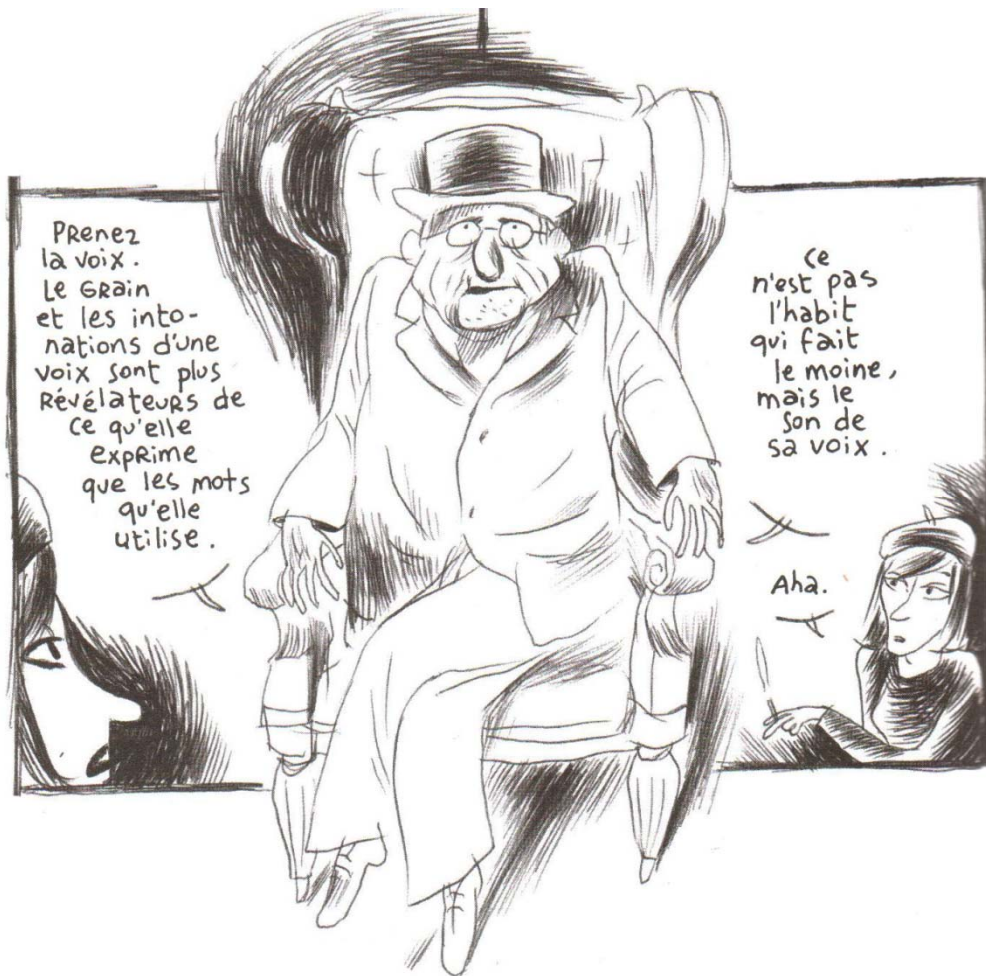
LISTE DES PRINCIPAUX SIGLES & ABRÉVIATIONS – ANGLAIS

ANOVA	Analysis of variance
ANCOVA	Analysis of covariance
BAT	Binaural average thresholds
BDI	Beck Depression Inventory
BOLD signal	Blood oxygenation level dependant signal
CRUNCH	Compensation-related utilization of neural circuits hypothesis
fo	Fundamental frequency
fo-E	fo-Equalized sounds
FOV	Field of View
GDS	Geriatric Depression Scale
H	High performance level
HAROLD	Hemispheric Asymmetry Reduction in OLDer adults
ISI	Inter-Stimulus Interval
MoCA	Montreal Cognitive Assessment
N	Natural sounds
NV	Non vocal
O	Older adults
PASA	Posterior-Anterior Shift in Aging
PSE	Point of Subject Equality
IQ	Intellectual quotient
L (Article 1)	Participants with audiometric thresholds under the group average
L (Article 2)	Low performance level
S	Participants with audiometric thresholds above the group average
STS	Superior Temporal Sulcus

TE	Echo Time
TR	Repetition Time
TTG	Transverse Temporal Gyrus
TVA	Temporal Voice Areas
V	Vocal
VPA	Voice Perception Assessment
WAIS-R	Weschler Adult Intelligence Scale-Revised
Y	Young adults

À Nicolas.

Et à la crevette aussi.



Case tirée de l'œuvre Sacha

© Charles Berberian / Cornélius 2009

(Discussion entre Abraham, père des croyants, et Dieu)

[...] « Mais cela ne prouve-t-il pas que je t'aime? J'étais prêt à tuer mon fils unique pour te montrer mon amour. »

Et le Seigneur parla en sa grande sagesse : « Ça ne prouve qu'une chose : que des crétins suivront toujours les ordres, si imbéciles soient-ils, pour peu qu'ils soient formulés par une voix autoritaire, retentissante, et bien modulée! »

Le manque d'humour du père des croyants

(traduction libre)

Woody Allen (1974). Magazine Wittenburg Door

REMERCIEMENTS

C'est avec une dose certaine d'enthousiasme, mais aussi de regrets que je m'apprête à laisser derrière moi mon statut d'éternelle étudiante qui, je l'avoue bien volontiers, m'était devenu remarquablement confortable! Il m'est ainsi impossible de ne pas considérer avec gratitude tous ceux et celles qui m'ont aidée, soutenue, encouragée, mais également mise au défi tout au long de ces années. Ces quelques mots se veulent donc un modeste hommage à leur apport pas du tout modeste à ce travail!

Je tiens de prime abord à remercier mon superviseur, Pascal, grâce à qui tout a pu débiter, mais aussi se terminer! Lorsque fraîchement arrivée de France je débarquai dans ton bureau, tu n'hésitas pas à me proposer un projet, ni surtout à me faire une place dans ton labo. Merci pour cette confiance. De toi je garderai le désir perpétuel du travail bien fait! Je tiens à remercier tout aussi chaleureusement mon co-superviseur, Yves, qui accepta sans réserve de prendre part à mon projet doctoral lorsque Pascal quitta Montréal pour une contrée européenne bien plus verdoyante! Votre grande disponibilité, votre enthousiasme et votre force tranquille furent toutes trois essentielles à la réalisation de cette thèse.

Plusieurs collègues ont su laisser une marque indélébile sur mon parcours doctoral. D'entrée de jeu, je tiens à remercier ceux avec qui tout commença, soit les joyeux lurons du LCV (Kateri, Isabelle et Ian). En votre compagnie, couper des sons n'aura jamais été activité si ludique! Je décerne une mention toute spéciale à Jeepee, Sarah et Alexe, qui passèrent rapidement du statut de comparses de labo à celui d'amis chers. Grâce à vous, les marathons de demandes de bourses devinrent tout aussi désopilants que nos soupers festifs! Je tiens aussi à remercier chaleureusement tous les *Bramsiens* que j'eus la chance de côtoyer, notamment Sébastien P., Sébastien N. et Fanny-Maude. L'atmosphère bon enfant du labo donna des allures de camps de vacances à nos intenses étés de recherche!

Le savoir-faire et le talent de plusieurs contribuèrent de manière plus concrète, mais tout aussi significative à cette thèse. Fanny-Maude, mille mercis d'avoir accompli un boulot si remarquable lors de l'acquisition des données comportementales et de neuroimagerie. Merci également à Cyril, sans qui la tâche adaptative ne serait pas, ainsi qu'à Carollyn, André et Mathieu de l'UNF, pour votre temps, vos conseils et votre bonne humeur! Je souhaite par ailleurs

souligner l'apport de tous les participants, jeunes et moins jeunes, qui se prêtèrent de bonne grâce aux trois études de ce travail. Vous êtes le matériau brut m'ayant permis bâtir cette thèse, merci!

Que serait un parcours doctoral sans le soutien de ceux qui, ne s'y trouvant pas empêtrés, arrivent à garder la tête froide en cas de crise! Papa et maman, cette envie que j'ai de comprendre les choses me vient de vous. Je vous remercie d'avoir su inébranlablement m'encourager. Coco, mon second papa, votre jovialité et vos encouragements m'ont bien souvent portée lorsque les temps se faisaient plus durs, merci. Et surtout, continuez à me surprendre avec vos p'tits bijoux scientifiques! Alex, François, Karine et Jess, merci de m'avoir si agréablement permis de décompresser et de rester centrée sur les réels essentiels de la vie, que sont le bon vin, la bonne bouffe et la bonne compagnie! Vous avez été les soupapes m'ayant permis d'évacuer un peu de toute cette pression et du coup, de ne pas trop perdre la boule! Un clin d'œil à deux collègues de premier choix Julie et Martine de l'IUSMM; vos encouragements et votre support m'ont été précieux dans les derniers milles.

Jess, on se ressemble tellement que cette année, en plus d'avoir vécu simultanément les mêmes angoisses existentielles, on gradue ensemble! Saches que ton amitié m'est inestimable. Merci d'être forte et fragile à la fois, et de m'accepter avec tous mes paradoxes et toutes mes névroses !

Et enfin, mon Nicolas, le dernier, mais tout, vraiment tout sauf le moindre. Ce travail t'est dédié, ce qui en dit long sur l'ampleur de ma gratitude à ton égard. Les mots me manquent alors, quoi te dire d'autre que : « merci pour TOUT ! »

CHAPITRE I

INTRODUCTION THÉORIQUE

1.1 AVANT-PROPOS

Parmi la kyrielle de sons constituant notre environnement auditif, il en est un qui revêt une importance toute particulière : la voix humaine. Et l'importance de la voix pour l'Homme serait telle qu'on retrouverait au sein même du système nerveux central, des zones dédiées à son traitement (entre autres, Belin et al., 2000). Toutefois, lorsqu'il vieillit, l'être humain deviendrait moins efficace pour décoder adéquatement les différentes informations véhiculées par la voix, et ces difficultés seraient présentes pour la parole, mais également pour les informations non langagières contenues dans la voix (p. ex. les intonations émotionnelles). En conséquence, les adultes plus âgés seraient moins bons que des jeunes adultes lors de l'interprétation des informations contenues dans la voix (entre autres, Mitchell & Kingston, 2011).

Malgré leur importance, somme toute peu de choses sont à ce jour connues sur la manière dont le vieillissement affecte le traitement des informations vocales non langagières. D'une part, les phénomènes sous-tendant l'apparition des difficultés de traitement vocal non langagier ne sont toujours pas bien compris, et d'autre part, aucune étude n'a testé de manière expérimentale si un lien existait entre ces difficultés et les modifications cérébrales fonctionnelles pouvant prendre place lors du vieillissement normal. C'est dans la perspective singulière révélée par la découverte des aires vocales cérébrales, que les travaux empiriques de cette thèse viseront à combler ces lacunes.

À la fois en raison de la fréquence à laquelle l'Homme y est exposé, mais également du fait que son décodage s'avère essentiel, d'abord à l'attachement, puis à l'intégration sociale, la voix humaine semble occuper à elle seule une place bien à part dans le monde auditif. Elle sert bien évidemment de médium à la transmission orale d'informations langagières par le biais de la parole, mais en parallèle, elle véhicule également des informations de nature non linguistique, telles qu'une intonation interrogative, un débit rapide lors d'un stress ou encore un rire (cf. Figure 1). Et ces informations non linguistiques, qui sont souvent produites involontairement par le locuteur, renseignent au moins tout autant sur sa personne que peuvent le faire ses propos. Ainsi, à l'exception du visage, la voix constitue l'élément le plus représentatif de ce que nous sommes, de ce que nous pensons ou de ce que nous ressentons, justifiant ainsi son appellation de « visage auditif » (Belin, Bédard & Fecteau, 2004).

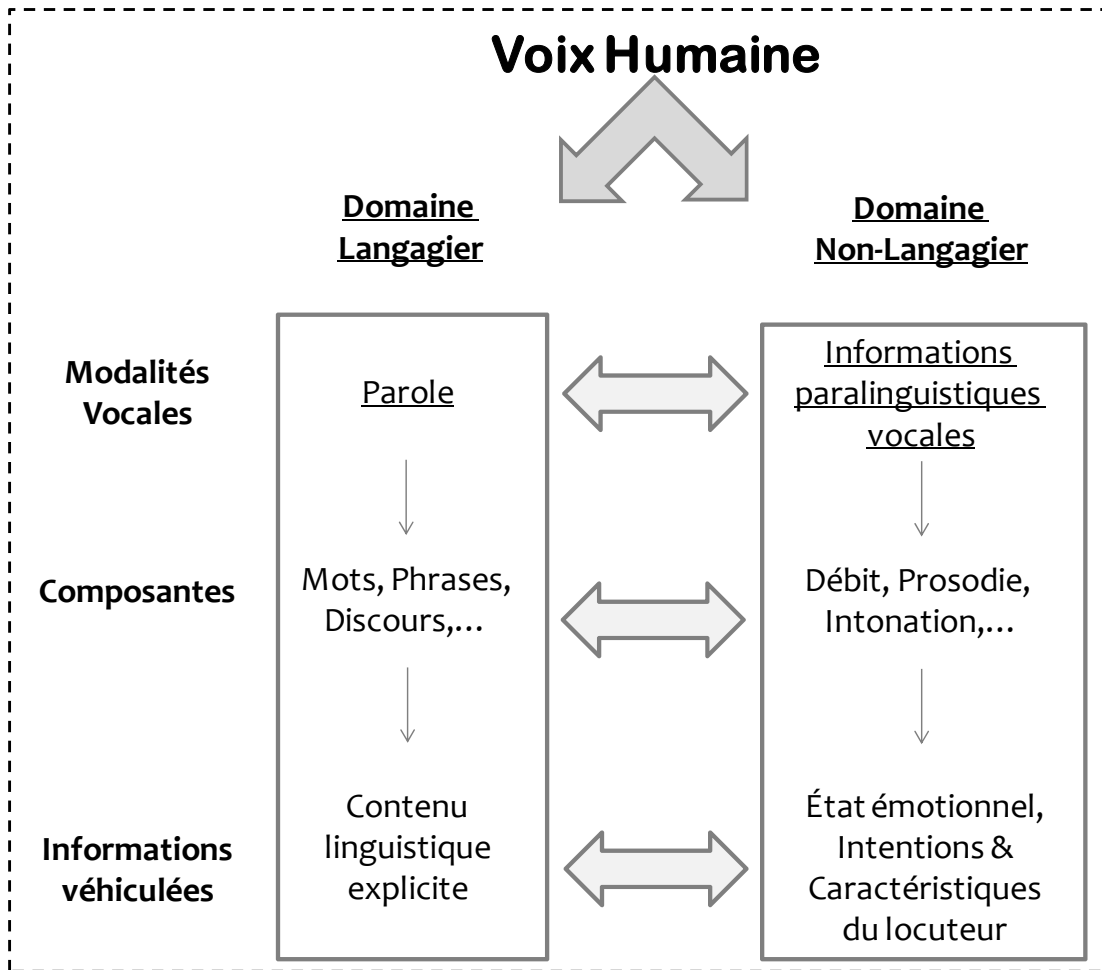


Figure 1. Synthèse des différentes informations véhiculées par la voix humaine

Description générale des informations pouvant être contenues dans la voix humaine, ainsi que du médium à travers lequel elles peuvent être véhiculées.

Cette aptitude à décoder les informations contenues dans la voix humaine se modifierait au fil du temps. Vraisemblablement en lien avec la relation privilégiée que l'Homme entretient avec le langage oral, la grande majorité des travaux s'étant intéressés aux changements touchant le traitement des informations vocales lors du vieillissement a privilégié l'investigation du domaine de la parole (pour revue, voir Schneider, Daneman & Pichora-Fuller, 2002). Ce champ d'études s'avère particulièrement vaste, et c'est pourquoi, dans un souci de concision ainsi que de pertinence quant à la problématique centrale de cette thèse, cette introduction théorique est essentiellement axée sur les données de la littérature s'intéressant au traitement des

informations vocales non linguistiques. En conséquence, les modifications du traitement de la parole survenant au cours du vieillissement ne seront pas abordées dans ce travail.

Les études ayant exploré l'impact du vieillissement normal sur les capacités de traitement de l'information paralinguistique vocale sont essentiellement des études de nature comportementale. En outre, elles ont préférentiellement ciblé le traitement de stimuli vocaux non linguistiques émotionnels, une classe bien à part d'informations vocales non linguistiques (entre autres, Allen & Brosgole, 1993; Orbelo et al., 2005; Ruffman et al., 2009 ou Ryan et al., 2010). L'ensemble de ces études suggère que le vieillissement normal affecte négativement certains aspects du traitement de l'information non linguistique vocale, et qu'il serait en conséquence plus ardu pour les adultes âgés de reconnaître et de traiter certaines de ces informations. Le premier objectif de cette thèse consiste à valider ces observations, mais pour le traitement de stimuli paralinguistiques vocaux non émotionnels.

Afin de rendre compte des difficultés susmentionnées affectant le traitement d'informations vocales émotionnelles, trois hypothèses étiologiques ont été suggérées : le déclin des 1) capacités auditives et 2) cognitives survenant lors du vieillissement, ainsi que 3) la mise en place de modifications cérébrales anatomophysiologiques et fonctionnelles, également liées à l'âge. Alors que les hypothèses perceptuelle et cognitive ont toutes deux été testées empiriquement, il n'en est rien pour l'hypothèse d'une modification cérébrale fonctionnelle. Le second objectif général de ce travail vise ainsi à problématiser empiriquement, pour la toute première fois cette question, toujours en ciblant préférentiellement le traitement des informations vocales non langagières et non émotionnelles.

Dans la première partie de cette introduction, il importe de définir d'entrée de jeu en quoi consistent les informations paralinguistiques vocales, leur rôle, ainsi que les paradigmes expérimentaux permettant de les évaluer. La seconde partie de l'introduction s'intéresse plutôt aux changements survenant lors du vieillissement normal, au niveau des capacités de traitement paralinguistique vocal. La troisième partie vise quant à elle à détailler les principaux facteurs causaux qui pourraient être impliqués dans la survenue avec l'âge de ces difficultés. En fin de section, les études de neuroimagerie ayant permis de mettre en évidence la présence de régions cérébrales impliquées sélectivement dans le traitement de la voix humaine sont présentés, ces travaux constituant la pierre d'assise de cette thèse.

1.2 TRAITEMENT PARALINGUISTIQUE VOCAL & VIEILLISSEMENT NORMAL : DONNÉES EMPIRIQUES

1.2.1 INTRODUCTION

Une croyance populaire veut que lorsque l'on discute avec une personne, l'essentiel de ce l'on transmet comme information ne provienne pas de ce que l'on dit, mais plutôt de ce qui accompagne nos propos. Mehrabian est l'un des premiers chercheurs à s'intéresser à la question et à étudier la métacommunication, c'est-à-dire « l'ensemble des mimiques, attitudes, intonations, signaux affectifs qui accompagnent l'énoncé d'un message verbal et en renforcent, modifient ou infirment le contenu » (Dictionnaire de la Psychiatrie, 2010). Ces informations dites paralinguistiques peuvent être produites consciemment par le locuteur (p. ex., l'ironie), mais aussi inconsciemment (en raison de l'anxiété p. ex.). Les travaux de Mehrabian démontrent ainsi que dans certains contextes bien précis (entre autres, lors d'un entretien d'embauche ou d'une discussion entre amis), 93 % des informations que l'on communique à autrui passeraient par la sphère paralinguistique : soit 38 % pour l'intonation de la voix et 55 % pour les gestes, la posture et les expressions faciales. Dans ces situations, uniquement 7 % des informations transmises à l'interlocuteur proviendraient donc du contenu langagier du discours (Mehrabian, 1967). Il serait hasardeux de généraliser ces résultats à l'ensemble des situations sociales de la vie quotidienne, néanmoins ces données témoignent tout de même de l'importance que peut occuper la dimension paralinguistique dans les contextes relationnels. Les informations paralinguistiques sont ainsi cruciales, puisqu'elles renseignent sur différentes facettes du locuteur, dont l'état émotionnel dans lequel il se trouve, son genre, son âge, ses traits de personnalité, son état physiologique, etc.

Sur le plan vocal, les informations paralinguistiques comprennent, entre autres, la prosodie (ou le rythme), l'intonation, le débit, le volume ou l'accent (cf. Figure 1). Ces paramètres peuvent être modifiés consciemment (p. ex., parler plus fort lorsque l'on souhaite qu'un auditoire soit plus attentif), ou inconsciemment (p. ex., la présence de trémolos dans la voix lors d'une situation stressante), et peuvent avoir une consonance émotionnelle (p. ex., un rire) ou non (p. ex., un ton interrogatif). Toujours au niveau vocal, ces informations permettent également de nuancer le discours, en véhiculant par exemple le sarcasme, le mensonge, l'humour, ou l'ironie.

En outre, d'un point de vue ontogénétique, ce type de vocalisations apparaît très tôt chez le nouveau-né et joue un rôle relationnel essentiel. Ces productions sont en effet l'un des moyens privilégiés par le nourrisson pour interagir avec le monde extérieur (entre autres, Green et al., 1995). Ainsi, bien avant de savoir parler, l'enfant pleurera pour indiquer qu'il a faim, rira pour communiquer sa joie ou grognera pour exprimer son inconfort. Et dès l'âge de 5 mois, le tout-petit serait à même de discriminer certaines vocalisations émotionnelles, telle que la joie, la colère ou la tristesse (entre autres, Flom & Bahrick, 2007). L'enfant plus âgé serait quant à lui capable de décoder que sa mère est heureuse lorsqu'elle rit ou qu'elle est contrariée lorsque son ton de voix se fait dur. L'importance de ces capacités de décodage est telle que lorsqu'elles font défaut, comme dans certains troubles mentaux graves (p.ex. l'autisme ; entre autres, Eigsti et al., 2012 ou la schizophrénie ; entre autres, Bozikas et al., 2006), des difficultés relationnelles significatives peuvent être observées. À l'âge adulte, le caractère significatif des informations paralinguistiques vocales perdurerait, et la capacité de les décoder efficacement demeurerait essentielle dans le développement et le maintien de relations sociales adéquates et satisfaisantes (Carton, Kessler & Pape, 1999).

1.2.2 VIEILLISSEMENT NORMAL & TRAITEMENT PARALINGUISTIQUE VOCAL

Malgré l'importance avérée d'une lecture adéquate des informations paralinguistiques vocales dans notre fonctionnement quotidien, relativement peu d'études se sont attardées à évaluer l'impact du vieillissement sur ces processus. Les résultats de la majorité de ces travaux sont le plus souvent convergents et suggèrent que le vieillissement normal serait associé à un déclin des capacités à traiter les informations vocales de nature non linguistique. Certaines données de cette thèse permettront de nuancer cette position.

La section qui suit propose une révision chronologique de l'ensemble des études sur le sujet. En raison de leur caractère distinct, les travaux sur le traitement des informations paralinguistiques vocales émotionnelles et ceux abordant le traitement paralinguistique vocal non émotionnel sont présentés séparément.

1.2.2.1 Les débuts du domaine d'étude

C'est vers la fin des années 1970 que sont publiés les tout premiers travaux analysant l'impact du vieillissement sur le traitement des informations métacommunicatives. Ces études s'intéressent initialement aux conséquences du vieillissement pathologique sur la reconnaissance de mimiques faciales émotionnelles (Kurucz, Feldmar & Werner, 1979; Brosgole et al., 1981; Brosgole et al., 1983; Cohen & Brosgole, 1988). Pour l'ensemble de ces recherches, des difficultés au niveau de la reconnaissance des affects faciaux sont observées, et conséquemment, les auteurs concluent à la présence d'une agnosie affective faciale lors d'un syndrome démentiel.

L'étude de Cohen & Brosgole (1988), grâce à l'utilisation de vocalisations émotionnelles en tant que stimuli contrôles aux mimiques faciales émotionnelles, est la toute première à montrer que l'agnosie affective observée pour les visages serait également présente lors du traitement de l'information affective vocale. Étonnamment, cette étude objective de surcroît que la moitié des adultes constituant le groupe contrôle âgé présente également certaines difficultés à reconnaître les affects vocaux, quoique ces difficultés soient de moindre ampleur que celles observées dans le groupe de participants déments. Ces résultats sont donc les premiers à suggérer que le vieillissement normal pourrait s'accompagner d'un déclin des capacités de traitement paralinguistique vocal.

La grande majorité des études subséquentes qui abordent les thématiques de vieillissement normal et de traitement paralinguistique vocal, qu'il soit émotionnel ou non, confirme ces résultats et met en évidence des performances inférieures pour les participants âgés en comparaison à celles d'adultes plus jeunes (Cohen & Brosgole, 1988; Oscar-Berman et al, 1990; Allen & Brosgole, 1993; Brosgole & Weisman, 1995; Pell & Baum, 1997; Kiss & Ennis, 2001; Orbelo, Testa & Ross, 2003; Sullivan & Ruffman, 2004; Raithel & Hielscher-Fastabend, 2004; Fecteau et al., 2005; Orbelo et al., 2005; Mitchell, 2007; Paulmann, Pell & Kotz, 2008; Ruffman, Sullivan & Dittrich, 2009; Ryan, Murray & Ruffman, 2010; Ruffman, Halberstadt & Murray, 2009; Dupuis & Pichora-Fuller, 2010; Mitchell & Kingston, 2011).

1.2.2.2 Devis expérimentaux classiques et création des stimuli

Afin de faciliter la compréhension du lecteur concernant la suite de cette section (principalement les sous-sections 1.2.2.3 et 1.2.2.4), les principaux devis expérimentaux utilisés afin d'évaluer les capacités de traitement paralinguistique vocal sont décrits d'emblée.

Devis expérimentaux

Les études visant à tester les conséquences du vieillissement normal sur le traitement paralinguistique vocal utilisent des protocoles expérimentaux similaires. Ces travaux comparent habituellement les performances de jeunes adultes à celles d'ânés (60 ans et plus généralement) lors de protocoles comportementaux de discrimination ou d'identification. Les tâches consistent en la présentation d'enregistrements de vocalisations concernant lesquelles les participants doivent répondre à une/des question(s). Lors de protocoles de discrimination, les participants sélectionnent leurs réponses à partir de suggestions d'options fournies par l'expérimentateur. Généralement, ces choix prennent la forme d'indices visuels (p.ex., le nom d'une émotion, un dessin de visage représentant une émotion ou un signe de ponctuation). Quant aux protocoles d'identification, ils nécessitent plutôt que le participant verbalise sa réponse, sans que soient mis à sa disposition des choix de réponses.

Stimuli

Classiquement, deux types de stimuli paralinguistiques vocaux sont utilisés : les stimuli paralinguistiques vocaux émotionnels et les stimuli paralinguistiques vocaux non émotionnels.

Stimuli paralinguistiques vocaux émotionnels. Ils correspondent à des productions vocales, linguistiques ou non, véhiculant des informations acoustiques concernant l'état émotionnel du locuteur. Ces stimuli sont obtenus en enregistrant des acteurs durant la lecture de phrases, de mots ou de syllabes, le plus souvent de contenu linguistique neutre, tandis qu'ils adoptent une prosodie émotionnelle prédéterminée par l'expérimentateur. À titre d'exemple,

prenons une phrase émotionnellement neutre utilisée dans l'étude d'Orbelo et collaborateurs (2005) : « Je m'en allais au cinéma » (traduction libre). Le contenu linguistique de cette phrase est considéré comme étant émotionnellement neutre par les auteurs puisqu'il ne transmet aucune information explicite concernant un quelconque état émotionnel dans lequel se trouverait le locuteur¹. Afin d'étudier le traitement paralinguistique vocal, il serait demandé à un acteur de lire cette phrase en lui insufflant une prosodie émotionnelle, par exemple celle de la peur. Il s'agit donc à l'acteur de lire cette phrase sémantiquement neutre en adoptant une prosodie de personne apeurée.

Des stimuli émotionnels non linguistiques sont également utilisés et correspondent quant à eux à des vocalisations émotionnelles dépourvues de contenu linguistique, comme par exemple, un soupir de tristesse ou un cri de colère. À nouveau, ce sont les informations acoustiques, dont la prosodie, qui informent l'auditeur de l'état émotionnel véhiculé par la vocalisation. Ces stimuli, tout comme les précédents, sont typiquement obtenus en enregistrant des acteurs produisant sur commande les vocalisations renfermant le contenu émotionnel souhaité.

Stimuli paralinguistiques vocaux non émotionnels. Ils correspondent le plus souvent à des productions linguistiques dont la prosodie véhicule non pas des informations émotionnelles, mais bien des informations caractérisant les intentions du locuteur, ou caractérisant le locuteur lui-même. Par exemple, il pourrait être demandé à un acteur de lire la phrase neutre citée en exemple plus haut avec un ton interrogatif ou déclaratif.

Tel que mentionné précédemment, pour l'ensemble des études recensées qui abordent l'impact du vieillissement sur les capacités de traitement des informations paralinguistiques vocales, les stimuli utilisés sont invariablement créés en laboratoire. À titre d'exemple, citons une banque de stimuli disponible en libre accès étant composée de vocalisations affectives non langagières : les *Montreal Affective Voices* (Belin, Filion-Bilodeau & Gosselin, 2008). Ainsi, le

¹ Il pourrait cependant être précisé qu'aller au cinéma est une activité que la plupart des gens apprécient, et qu'en ce sens, la phrase n'est pas totalement neutre. Cette nuance n'est cependant pas faite par les auteurs œuvrant dans le domaine, et pour l'essentiel des études citées dans ce travail, une phrase est considérée émotionnellement neutre lorsque son contenu sémantique explicite est neutre.

contenu paralinguistique (émotionnel ou non) ne provient pas de situations naturelles, mais il est plutôt simulé par les acteurs. Afin de s'assurer que la prosodie produite par ces derniers correspond bien à l'étiquette souhaitée, certains auteurs sélectionnent des stimuli préalablement validés auprès d'une population d'adultes sains (Allen & Brosgole, 1993; Brosgole & Weisman, 1995; Orbelo et al., 2005; Ruffman et al., 2005; Ryan, Murray & Ruffman, 2010) ou effectuent eux-mêmes une validation préliminaire (Raithel & Hielscher-Fastabend, 2004; Fecteau et al., 2005; Ruffman, Halberstadt & Murray, 2009). Dans les deux cas, les objectifs finaux sont identiques, et consistent à s'assurer qu'il n'existe pas, pour les stimuli choisis, d'ambiguïté quant à l'émotion véhiculée, ainsi que de minimiser l'occurrence d'effets planchers ou plafond quant à la reconnaissance des sons vocaux.

1.2.2.3 Traitement paralinguistique vocal émotionnel & vieillissement normal

Avant de présenter les résultats des différentes études explorant les conséquences du vieillissement normal sur le traitement paralinguistique vocal affectif, il apparaît nécessaire de clarifier certains termes spécifiques aux champs d'étude des émotions. Afin de décrire les stimuli de nature émotionnelle, trois caractéristiques sont généralement utilisées :

- L'émotion véhiculée : par exemple, la tristesse, la joie, la surprise...
- La valence de l'émotion : la qualité intrinsèque d'« agréabilité » des stimuli (continuum allant de positif à négatif) ;
- L'activation contenue dans l'émotion : le niveau d'activation inhérent aux stimuli produits (continuum allant de faible à élevé).

À titre illustratif, le cri émis par un enfant qui reçoit à Noël, le cadeau tant désiré, pourrait être décrit comme : 1) véhiculant une émotion de surprise, 2) possédant une valence agréable, et 3) provenant d'un locuteur ayant un niveau d'activation élevé.

En ce qui a trait à l'intensité et à la valence, une étude comparant la perception de la prosodie affective vocale de jeunes adultes et d'aînés met en évidence des différences entre les groupes, en sachant qu'il n'y a pas forcément de bonnes ni de mauvaises réponses lors d'un

jugement de valence ou d'intensité. Ainsi, avec l'âge, les stimuli vocaux affectifs seraient d'une part, jugés comme étant moins intenses et d'autre part, comme ayant une valence plus neutre (Fecteau et al., 2005). Toujours selon ces auteurs, ces différences ne seraient pas retrouvées pour l'estimation de vocalisations dépourvues de contenu émotionnel (par exemple, un éternuement). En ce sens, comparativement aux estimations des jeunes adultes, les aînés semblent considérer les stimuli affectifs vocaux comme présentant moins de caractéristiques émotionnelles.

Il existe un plus grand bassin de données concernant les capacités à reconnaître les différentes émotions véhiculées par la prosodie vocale. Des différences sont ainsi retrouvées lorsque l'on compare les adultes jeunes et âgés, et les performances sont généralement plus faibles chez les aînés. En outre, le vieillissement normal altérerait de manière différentielle la perception des différentes émotions du spectre. Plusieurs études objectivent ainsi de manière convergente que la reconnaissance de la colère (Brosgole & Weisman, 1995; Sullivan & Ruffman, 2004; Paulmann, Pell & Kotz, 2008; Ryan, Murray & Ruffman., 2010) et de la tristesse (Wong, Cronin-Golomb & Nearing, 2005; Sullivan & Ruffman, 2004; Ryan, Murray & Ruffman, 2010; Dupuis & Pichora-Fuller, 2010) serait plus difficile pour les participants âgés. Des difficultés pourraient également être présentes pour la reconnaissance de la joie (Wong, Cronin-Golomb & Nearing, 2005; Sullivan & Ruffman, 2004; Ryan, Murray & Ruffman, 2010) et du dégoût (Sullivan & Ruffman, 2004).

Ce déclin des capacités de traitement des informations paralinguistiques vocales affectives semble par ailleurs s'accroître avec l'âge. En ce sens, à l'intérieur d'un même groupe de participants d'adultes âgés, des sous-groupes peuvent parfois être identifiés. C'est le cas pour l'étude d'Allen et Brosgole (1993), où en fonction de leur performance, le groupe d'adultes âgés normaux peut être scindé en deux (six participants chacun), le sous-groupe âgé moins performant commettant le double des erreurs commises par les participants du sous-groupe âgé plus performant. Fait intéressant, les aînés du sous-groupe le moins performant sont environ cinq ans plus âgés que ceux du sous-groupe performant le mieux. Ce résultat suggère que l'intensité des difficultés de traitement de l'information paralinguistique vocale émotionnelle s'accroîtrait plus on vieillit. Brosgole et Weismann (1995) ont quant à eux effectué une étude transversale comparant les performances de six groupes d'âge lors du traitement de

l'information émotionnelle contenue dans la voix et sur les visages (deux groupes d'enfants, un groupe d'adolescents et trois groupes d'adultes). Les résultats révèlent une amélioration des performances lors du traitement de la prosodie affective vocale débutant dans l'enfance et perdurant jusqu'au début de la quarantaine. Par la suite, un déclin graduel est observé. De fait, ce sont pour les participants les plus âgés de l'étude (âge moyen : 75,2 ans) que les plus faibles performances sont recensées. Ces données suggèrent que les capacités de traitement des informations paralinguistiques contenues dans la voix s'affineraient au fur et à mesure du développement, jusqu'à l'atteinte d'un plateau, auquel succéderait un déclin dans la quarantaine. Un accroissement des difficultés avec l'âge est également retrouvé pour une tâche similaire de discrimination de la prosodie affective vocale (Kiss et Ennis, 2001). En segmentant leurs deux groupes expérimentaux (jeunes adultes et adultes âgés) par tranche de 10 ans (intervalle d'âge : 29 à 89 ans), les auteurs observent que le nombre d'erreurs augmente avec l'âge. À titre d'exemple, lors d'une tâche de discrimination effectuée avec pour stimuli, des phrases neutres lues avec une prosodie émotionnelle (joie, tristesse ou colère), les participants âgés de 60 à 69 ans commettent 14 erreurs ($\pm 4,34$ é. t.) alors que les participants âgés de 80 à 89 ans en commettent 21,35 ($\pm 6,47$ é. t.). Notons toutefois qu'aucune comparaison statistique des performances distribuées par tranches d'âge de 10 ans n'est rapportée afin d'étayer cette observation.

Deux études ultérieures corroborent ces résultats (Ruffman, Halberstadt & Murray, 2009; Ryan, Murray & Ruffman, 2010). Les auteurs, en segmentant les performances des participants jeunes en quartiles et en répartissant par la suite les performances des participants âgés dans ces différents quartiles, font un parallèle direct entre la répartition des performances des deux groupes. Pour une tâche de discrimination de prosodie vocale affective (matériel linguistique et vocalisations non linguistiques), 40 % du groupe âgé se classe dans le quartile le plus faible. Pour une tâche d'appariement d'émotions vocales avec un visage émotionnel, 63 % des participants âgés se retrouvent quant à eux dans le quartile le plus faible. Selon les auteurs, cette dernière condition serait moins bien réussie, car elle s'avère plus complexe : elle nécessite en effet le décodage et l'intégration de deux types d'informations émotionnelles. Cette nuance est importante, et nos données permettront d'apporter plus de précisions à son sujet. Vraisemblablement en lien avec cet impact du niveau de complexité de la tâche sur les performances, le degré de congruence ou de dissonance entre l'émotion véhiculée par la

prosodie et celle du contenu linguistique transmis dans des phrases semble aussi affecter les performances des adultes âgés (Dupuis & Pichora-Fuller, 2010). De manière générale, les performances des aînés sont inférieures à celles des adultes jeunes, et cet écart s'accroît plus le niveau de dissonance entre le contenu sémantique de la phrase et la prosodie affective est important.

1.2.2.4 Traitement paralinguistique vocal non émotionnel & vieillissement normal

Comparativement au traitement de la prosodie vocale affective, très peu d'études se sont intéressées aux conséquences du vieillissement normal sur le traitement des informations non émotionnelles véhiculées par la voix humaine. Néanmoins, tout comme pour le traitement paralinguistique émotionnel, ces quelques travaux suggèrent la présence d'un déclin lié à l'âge.

En 1986, Linville et Korabic comparent la capacité de femmes âgées et d'adultes jeunes à catégoriser l'âge de locutrices à partir de productions vocales neutres (voyelles) parlées ou murmurées. Leurs résultats suggèrent que les deux groupes classent de manière similaire les stimuli entendus, c.-à-d. que les adultes jeunes et âgés placent généralement les mêmes stimuli dans les mêmes groupes d'âge proposés (25-35 ans, 45-55 ans et 70-80 ans). Néanmoins, en comparant les deux groupes de manière plus fine, des divergences sont relevées quant à la fiabilité de leurs réponses. Tous les stimuli étant présentés deux fois durant la phase expérimentale, les auteurs calculent, pour chaque son et pour chaque participante, un pourcentage d'accord. Ces comparaisons indiquent ainsi que les estimations des sujets âgés ne sont pas aussi fiables que celles des sujets jeunes (groupe âgé et jeune respectivement, voyelles parlées : 69,1 % vs 75,5 % ; voyelles murmurées : 62,4 % vs 75,5 %).

Afin de déterminer quels types d'informations acoustiques permettent aux deux groupes de catégoriser les voix présentées (c.-à-d., quelle stratégie est utilisée par les participants), Linville et Korabic (1986) effectuent des analyses corrélationnelles entre différentes mesures acoustiques caractérisant les stimuli et les performances. Ils observent qu'en dépit du fait que les deux groupes catégorisent les sons de manière similaire, ils n'utilisent pas les mêmes informations acoustiques afin de réaliser la tâche. Ces résultats sont cruciaux puisqu'ils soulignent que pour arriver à des performances de catégorisation similaires, les participants plus

âgés ont recours à un plus large spectre d'informations acoustiques (voisement et résonnance) comparativement aux jeunes adultes, qui se baseraient principalement sur les informations de voisement. La stratégie utilisée pour effectuer la tâche semble donc se modifier en fonction de l'âge, une observation également retrouvée dans une des études empiriques présentées dans le chapitre II de ce travail.

En parallèle des difficultés de traitement de la prosodie vocale affective décrites à la section 1.2.2.3, le vieillissement normal serait également associé à un déclin des performances de traitement de la prosodie vocale non affective. À l'inverse de la prosodie affective, la prosodie vocale non affective ne véhicule pas d'informations sur l'état affectif du locuteur, mais elle transmet plutôt des informations permettant de guider l'individu quant à la manière de comprendre les propos évoqués (p.ex., question, humour, sarcasme...). Tout comme le traitement de la prosodie vocale affective, les adultes âgés performant moins bien que les jeunes adultes lors de tâches nécessitant la discrimination ou l'identification, pour des phrases neutres, du ton, qui peut être soit affirmatif, déclaratif ou interrogatif (Allen & Brosgole, 1993). Une étude ultérieure confirme ces résultats et indique que pour des tâches similaires, le groupe le plus âgé commet plus d'erreurs que le groupe d'adolescents et de jeunes adultes (Brosgole & Weisman, 1995).

Le vieillissement normal serait également associé à la survenue d'un déclin touchant le traitement d'un autre aspect de la prosodie vocale non émotionnelle, soit le décodage du sarcasme. Le taux d'identification de tons sarcastique et sincère s'avère ainsi inférieur chez les participants âgés en comparaison aux jeunes adultes (Orbelo et al., 2005).

1.2.2.5 Synthèse : vieillissement normal & traitement paralinguistique vocal

En somme, le vieillissement normal semble affecter le traitement de la prosodie vocale en général, qu'elle soit émotionnelle ou non. Les études ayant évalué le traitement des informations paralinguistiques vocales émotionnelles suggèrent fortement que le vieillissement normal est associé à l'apparition de difficultés de reconnaissance des informations paralinguistiques émotionnelles contenues dans la voix humaine. Ces difficultés toucheraient de manière différentielle le spectre émotionnel. En outre, lorsque plusieurs informations doivent

être intégrées ou lorsque le contenu linguistique des phrases contredit l'intonation, complexifiant ainsi la tâche, il est plus ardu pour les adultes âgés de reconnaître la prosodie affective véhiculée.

Les quelques études effectuées sur les capacités de traitement paralinguistique non émotionnel suggèrent également un déclin avec l'âge. Notons qu'il est actuellement difficile de statuer quant au rôle différentiel de l'âge dans le déclin des capacités de traitement la prosodie vocale émotionnelle en comparaison avec la prosodie vocale non émotionnelle, peu d'études ayant analysé la question. Par ailleurs, les quelques données sur le sujet sont contradictoires : les résultats d'une étude suggèrent un effet délétère de l'âge plus marqué pour le traitement de la prosodie non affective (Allen & Brosgole, 1993) alors que deux autres études montrent plutôt un impact plus négatif du vieillissement sur les capacités de traitement paralinguistique vocal émotionnel (Brosgole & Weisman, 1995; Mitchell & Kingston, 2011).

1.3 TRAITEMENT PARALINGUISTIQUE VOCAL & VIEILLISSEMENT NORMAL : HYPOTHÈSES EXPLICATIVES

Les résultats présentés précédemment suggèrent de manière assez robuste que le vieillissement normal est associé à un déclin des capacités de traitement de l'information paralinguistique vocale, qu'elle soit de nature émotionnelle ou non. Afin d'illustrer ces changements, trois facteurs explicatifs sont proposés, soit : la survenue d'un déclin auditif, d'un déclin cognitif et de modifications cérébrales, qu'elles soient anatomophysiologiques ou fonctionnelles. Quelques travaux testent les deux premières hypothèses de manière empirique, et ceux-ci arrivent à la conclusion que les déclin auditifs et cognitifs ne permettent d'expliquer qu'une faible portion du phénomène. Ainsi, certains auteurs se sont tournés vers l'hypothèse explicative d'une modification cérébrale afin de rendre compte des différences de performances entre les jeunes adultes et les aînés. Néanmoins, aucune étude n'a tenté de vérifier expérimentalement la validité de cette hypothèse pour le traitement paralinguistique vocal. Rappelons qu'un des objectifs de ce travail est précisément de remédier à cette lacune.

Afin d'éclairer le lecteur quant aux cheminements réflexifs des auteurs ayant étudié la question du déclin des capacités de traitement des informations paralinguistiques vocales lors du

vieillesse normale, les travaux explorant les hypothèses explicatives des déclins auditif et cognitif sont présentés dans la section subséquente. En ce qui concerne l'hypothèse d'une modification cérébrale, aucune étude empirique n'ayant été effectuée, ce sont plutôt les argumentaires des auteurs quant au rôle qu'elle pourrait jouer dans l'apparition des difficultés de traitement paralinguistique vocal au cours du vieillissement normal qui sont détaillés. Afin d'appuyer leur réflexion, ces auteurs s'inspirent fortement des résultats de travaux provenant du domaine de l'étude des visages.

1.3.1 LE DÉCLIN DES CAPACITÉS AUDITIVES

Une étude épidémiologique de Cruickshanks et collaborateurs publiée en 2003 montre que 49,9 % des 3753 sujets âgés sondés présentent une diminution de leurs capacités auditives. De plus, selon un document de Statistiques Canada, environ 11 % des 65 ans et plus et 23 % des 75 ans et plus déclarent souffrir de troubles auditifs majeurs au Canada (Millar, 2005). Ces difficultés affectent la manière dont les stimuli auditifs en général sont traités et donc, possiblement les informations véhiculées par la voix.

1.3.1.1 Déclin auditif normal lié à l'âge : la presbyacousie

Il a été objectivé de manière consensuelle que le vieillissement normal s'accompagne d'une diminution bilatérale progressive de l'acuité auditive. Le terme presbyacousie a été choisi pour désigner cette manifestation, expression provenant de la juxtaposition des mots grecs *Presbys* (vieil homme) et *Akousis* (audition). À ses débuts, le phénomène touche principalement les plus hautes fréquences du spectre sonore (> 4 kHz), qui deviennent ainsi plus difficilement perceptible pour l'adulte âgé. À ce stade, l'information vocale langagière peut être plus laborieuse à traiter, et la première manifestation du phénomène serait d'induire des difficultés de compréhension de la parole, principalement dans des environnements bruyants ou réverbérants. Lorsque la presbyacousie progresse et touche les fréquences plus basses (2-4 kHz), la compréhension de certaines consonnes peut être compromise et il n'est pas rare de voir apparaître une confusion pour certains mots (à titre d'exemple, confondre les mots anglais

sunday et *someday*). Lorsque les fréquences inférieures à 2 kHz sont affectées, la compréhension de la parole est plus hypothéquée. Outre ce déclin des capacités à traiter le langage oral, la presbyacousie est également associée à une diminution de l'acuité auditive, principalement dans les endroits bruyants, à un ralentissement de la vitesse de traitement des structures auditives centrales ainsi qu'à des difficultés de localisation de sources sonores (pour revue, voir Gates & Mills, 2005). L'origine de la presbyacousie serait multifactorielle et de manière générale, elle est conceptualisée comme résultant de l'exposition, tout au long de la vie, à des stress auditifs variés, ainsi qu'à la mise en place de processus de sénescence auditive génétiquement déterminés. En résulte des altérations pouvant survenir à divers paliers du système auditif, que ce soit au niveau des structures périphériques ou centrales (pour revue, voir Gates & Mills, 2005). Environ 40 % des personnes âgées de 65 ans et plus présenterait un profil de difficultés auditives compatible avec la presbyacousie, et plus l'individu vieillit, plus la prévalence de ce trouble s'accroît (Ries, 1994).

Lorsque les difficultés perceptuelles pour les fréquences plus basses s'ajoutent à celles déjà présentes pour les aiguës, la presbyacousie peut entraver la compréhension de la parole et du discours, et ce même dans des environnements dépourvus de bruit ambiant (pour revue, voir Gates & Mills, 2005). C'est la raison pour laquelle il a été suggéré que cette manifestation pouvait également avoir un impact délétère sur le traitement des informations non langagières véhiculées par la voix. Dans la section qui suit, les résultats des travaux évaluant le lien entre la presbyacousie et les difficultés de traitement de l'information paralinguistique vocale sont décrits. Ces données suggèrent que le déclin auditif lié à l'âge contribuerait de manière moins significative à l'installation des difficultés de traitement paralinguistique vocal comparativement à celles touchant le traitement de la parole. La présence de presbyacousie permettrait tout de même de rendre compte d'une certaine portion des difficultés de traitement paralinguistique vocal survenant au cours du vieillissement.

1.3.1.2 Déclin auditif lié à l'âge & traitement paralinguistique vocal

Les premières études ayant mis en évidence une association entre le vieillissement normal et le déclin des performances lors du traitement de l'information paralinguistique vocale

suggèrent que la présence de difficultés auditives pourrait expliquer ce déclin (Linville & Korabic, 1986; Allen & Brosgole, 1993; Brosgole & Weisman, 1995; Orbelo, Testa & Ross, 2003). Étonnamment, une seule de ces études effectue un examen audiométrique préliminaire afin de quantifier l'acuité auditive des participants, et malheureusement, les auteurs ne mettent pas en relation les scores audiométriques et les performances obtenues aux épreuves de traitement paralinguistique vocal (Linville & Korabic, 1986). Ils suggèrent tout de même que l'utilisation réduite, par les aînés, de certaines informations acoustiques lors de la réalisation de la tâche, découlerait de la présence de presbyacousie. En effet, pour catégoriser les stimuli dans les différents groupes d'âge, les adultes âgés se basent moins que les plus jeunes sur la modulation des fréquences fondamentales (f_0^2), et la presbyacousie est aussi généralement associée à une difficulté à détecter les modulations fréquentielles (Zurek & Fomby, 1981).

Il faut attendre le début des années 2000 pour que la question du lien entre le déclin auditif associé au vieillissement normal et les difficultés de traitement paralinguistique vocal soit étudiée de manière directe (Orbelo et al., 2005). Dans cette étude, les auteurs quantifient la contribution de l'acuité auditive au traitement paralinguistique vocal à l'aide de régressions multiples pas à pas (*stepwise regressions*). Pour ce faire, les performances audiométriques (aux fréquences de 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 et 8000 Hz) sont considérées en tant que facteurs prédictifs, et les performances aux épreuves paralinguistiques (tâches d'identification et de discrimination de l'affect contenu dans diverses productions vocales) en tant que variables dépendantes. Selon ces analyses, le déclin auditif lié à l'âge ne permet pas de prédire les performances aux épreuves de traitement de prosodie vocale, qu'elle soit émotionnelle ou non. Il permettrait tout de même d'expliquer, dépendamment des tâches, entre 16 % et 22 % de la variance observée, ce qui correspond à un faible pouvoir prédictif selon les auteurs. En conclusion, ils suggèrent qu'il ne serait pas nécessaire de tester exhaustivement l'acuité auditive des participants âgés, et qu'un dépistage de base serait suffisant, puisque le déclin auditif ne semble pas interférer de manière significative avec le traitement de la prosodie vocale.

Dans une étude plus récente, et à l'aide d'une tâche de discrimination de prosodies émotionnelles et non émotionnelles, des chercheurs abordent différemment la question (Mitchell & Kingston, 2011). Ils introduisent plutôt les seuils de détection pour deux basses

² La fréquence fondamentale (f_0) correspond au nombre de cycles d'ouverture-fermeture des cordes vocales par seconde, ce qui permet de conférer la nature grave, moyenne ou aiguë de la voix naturelle.

fréquences (1000 et 2000 Hz) en tant que variables contrôles dans les analyses statistiques comparant les performances d'adultes jeunes et âgés. Ces fréquences ont été sélectionnées en raison de leur importance quant à la transmission d'informations langagière. En dépit de ce contrôle, les performances des adultes âgés sont significativement inférieures à celles des adultes plus jeunes, suggérant, tout comme l'étude précédente, que le déclin auditif lié à l'âge quantifié par une audiométrie tonale et touchant les basses fréquences sélectionnées, ne rend pas totalement compte des différences de performances entre les deux groupes.

À notre connaissance, ces deux études sont les seules à tenter de mettre en évidence le lien entre la presbycousie et les difficultés de traitement de l'information vocale paralinguistique. Leurs conclusions doivent donc être considérées avec précautions, puisqu'à ce jour, elles n'ont pas encore été corroborées.

1.3.1.3 Synthèse : vieillissement auditif & traitement paralinguistique vocal

Malgré le peu de données traitant du sujet, les résultats des études existantes sont néanmoins convergents. Ils suggèrent que contrairement à ce qui est observé pour le domaine langagier (pour revue, voir Schneider, Daneman & Pichorra-Fuller, 2002), la presbycousie n'affecterait pas de manière manifeste le traitement des informations vocales paralinguistiques émotionnelles chez les adultes âgés.

À ce jour, cette relation n'a pas encore été testée pour le traitement d'informations paralinguistiques vocales non émotionnelles. Une de nos études comportementales vise justement à pallier ce manque.

1.3.2 LE DÉCLIN DES CAPACITÉS COGNITIVES

Selon les auteurs des premières études illustrant l'occurrence d'un déclin des capacités de traitement paralinguistique vocal au cours du vieillissement, il est pertinent de s'intéresser au lien causal unissant la présence de difficultés cognitives et l'installation de difficultés de traitement de l'information paralinguistique vocale. En effet, la toute première étude mettant en

évidence une diminution de ces capacités l'a fait auprès d'un groupe de personnes présentant un syndrome démentiel, et c'est précisément l'existence d'un déclin cognitif substantiel qui constitue le cœur même de ces syndromes (Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorder-5, 2013). Puisque le vieillissement normal s'accompagne également de l'affaiblissement de certaines capacités cognitives (pour revue, voir Glisky, 2007) — quoique d'ampleur significativement plus modeste que ce qui peut être observé lors de processus neurodégénératifs — le lien causal entre déclin cognitif et difficultés de traitement paralinguistique vocal pourrait également être envisageable en ce qui a trait au vieillissement normal.

La première partie de cette section vise à définir brièvement ce qu'est la cognition. Elle est suivie d'une description succincte des principales atteintes cognitives pouvant être observées lors du vieillissement normal. En conclusion, les travaux ayant testé le lien entre la survenue de difficultés cognitives et de difficultés de traitement paralinguistique vocal associées à l'âge sont détaillés.

1.3.2.1 Définitions

Afin de faciliter la compréhension du lecteur quant à la suite de cette thèse, il apparaît essentiel de définir certaines notions qui prendront leur importance ultérieurement.

Dans ce travail, les capacités cognitives font référence aux habilités qui permettent d'une part, de percevoir et de traiter les différentes informations de l'environnement. D'autre part, elles réfèrent aux capacités qui sous-tendent l'intégration et la manipulation de ces informations, afin de favoriser la mise en place d'actions ou de comportements plus ou moins complexes permettant de vaquer aux occupations du quotidien. Depuis les débuts de la recherche en psychologie cognitive, diverses capacités cognitives ont été conceptualisées, mais pour les besoins de cette thèse, uniquement certaines d'entre elles, listées et définies dans le Tableau 1, sont abordées.

Afin d'illustrer comment ces différentes capacités peuvent s'articuler entre elles, et ainsi permettre un fonctionnement adéquat, voici un court exemple illustratif. Pour arriver à

comprendre convenablement ce document, il est impératif que le lecteur, en plus d'être en mesure de voir et de décoder ce qui y est consigné, puisse se souvenir du contenu de la thèse qu'il a lue hier soir (capacités mnésiques). Il devra également réussir à garder en tête l'information lue au paragraphe précédent afin bien comprendre la phrase qu'il est actuellement en train de lire (capacités de mémoire de travail), être attentif à ce qu'il lit afin de ne pas être distrait par les bruits environnants (capacités attentionnelles), mais aussi, peut-être, résister à l'envie impérieuse d'arrêter sa lecture pour aller regarder une partie de hockey à la télévision (capacités exécutives).

Les habiletés cognitives permettent donc d'apprendre de nouvelles choses, d'être attentif lorsque l'on conduit, de lire un roman, de jouer à un jeu vidéo, de discuter avec des amis, de prendre une décision ou encore de s'habiller. En ce sens, un fonctionnement cognitif adéquat est essentiel pour mener une vie autonome.

CAPACITÉS COGNITIVES	DÉFINITIONS
Rendement intellectuel global	<p>A, entre autres, été opérationnalisé à l'aide de deux composantes générales:</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Habilités cristallisées</u>: somme des connaissances et expertises acquises tout au long de la vie. • <u>Habilités fluides</u>: somme des capacités permettant d'effectuer des actions/tâches nouvelles et de raisonner sur du nouveau matériel.
Mémoire épisodique	<p>Informations acquises via l'expérience, qui persistent dans le temps, qui peuvent être récupérées, même très longtemps après que la situation dont elles sont issues ait été vécue.</p> <p>Dépend de l'intégrité de 3 processus:</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Encodage</u>: mécanismes par lesquels l'information est transformée en représentations mnésiques • <u>Récupération</u>: mécanismes permettant à la trace mnésique encodée d'être réactivée • <u>Consolidation</u>: mécanismes permettant de modifier les représentations mnésiques encodées afin qu'elles deviennent stables et perdurent dans le temps.
Attention	<p>Peut être schématisée comme étant constituée de trois composantes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Attention sélective</u>: capacité à orienter son attention sur le stimulus cible en faisant abstraction des informations non pertinentes. • <u>Attention soutenue</u>: capacité permettant de maintenir son attention durant une période de temps prolongée. • <u>Attention divisée</u>: capacité à scinder son attention entre plus d'un stimulus cible.
Mémoire de travail	<p>Repose sur les capacités attentionnelles.</p> <p>Mémoire à court terme permettant de stocker des informations sur lesquelles un traitement cognitif peut être effectué.</p>
Capacités exécutives	<p>Association de plusieurs composantes travaillant de manière conjointe afin de permettre la mise en place et le contrôle d'actions dirigées vers un objectif précis.</p>

Tableau 1. Définitions des principales capacités cognitives abordées dans la thèse

1.3.2.2 Changements cognitifs associés au vieillissement normal

Plusieurs auteurs suggèrent que le déclin cognitif associé au vieillissement normal puisse rendre compte (totalement ou partiellement) des difficultés de traitement de l'information paralinguistique vocale présentes chez les adultes plus âgés. En ce sens, il appert essentiel de présenter le profil d'atteintes cognitives typiquement observé lors du vieillissement normal. Afin de rester centré sur la problématique principale de ce travail, ces difficultés seront décrites de manière sommaire (cf. Tableau 1 pour rappel).

En ce qui concerne le rendement intellectuel global, des travaux mettent en évidence un déclin des capacités d'intelligence fluide avec l'âge, alors que les capacités d'intelligence cristallisées demeurerait quant à elles stables (pour revue, voir Antsey & Low, 2004). Le déclin des capacités d'intelligence fluide serait possiblement lié, entre autres choses, à la diminution de la vitesse de traitement de l'information également observée avec l'âge (pour revue, voir Beason-Held & Horwitz, 2002). Notons que cette manière de segmenter le rendement intellectuel global peut être réductrice. Le fait que certaines des études présentées ultérieurement dans ce travail ait recours à cette conceptualisation pour rendre compte de leurs résultats justifie que ce soit celle décrite ici.

Les fonctions attentionnelles seraient également susceptibles de décliner avec l'âge, et l'écart le plus marqué entre les performances de jeunes adultes et d'aînés sains serait observé pour les capacités d'attention divisée et de mémoire de travail (pour revue, voir Glisky, 2007).

Un déclin substantiel au niveau des capacités mnésiques serait par ailleurs présent, et les processus d'encodage et de récupération seraient les plus touchés. En ce qui concerne l'encodage, les difficultés peuvent émerger du fait que les nouvelles informations sont encodées de manière moins significative ou moins élaborée, du fait que des difficultés à porter attention aux informations/détails périphériques soient présentes (Glisky, Rubin & Davidson, 2001), ou encore de la combinaison de ces deux facteurs. Les processus de récupération seraient quant à eux tout particulièrement sensibles au vieillissement normal. En ce sens, aller rechercher l'information en mémoire sans aide deviendrait plus difficile avec l'âge, vraisemblablement en lien avec des difficultés à mettre en place des stratégies actives de recherche en mémoire (pour revue, voir Glisky, 2007).

Quant aux capacités exécutives, un domaine cognitif de haut niveau, elles semblent également sensibles au vieillissement normal. Ainsi, l'ensemble de ces composantes pourrait être affecté, et tendrait à être moins efficace chez les adultes plus âgés (pour revue, voir Glisky, 2007).

Faits importants, l'impact négatif que pourrait avoir le vieillissement normal sur l'intégrité des capacités cognitives ne serait pas uniforme d'une capacité cognitive à une autre (Ivnik et al., 1995; Ylikoski et al., 1999) et pourrait être variable d'un individu à l'autre (entre autres, Morse, 1993 et Christensen et al., 1994).

La relation entre vieillissement normal et difficultés cognitives serait donc complexe et multifactorielle. Des mécanismes d'action neurophysiologiques, psychologiques et environnementaux pourraient y prendre part et ce, de manière hétérogène d'un individu à l'autre.

1.3.2.3 Déclin cognitif lié à l'âge et traitement paralinguistique vocal

Afin de tester l'hypothèse de la participation du déclin cognitif lié à l'âge dans l'apparition des difficultés de traitement paralinguistique vocal, Orbelo et collaborateurs (2005) évaluent, à l'aide de régressions multiples pas à pas (*stepwise regressions*), si les performances à certaines épreuves neuropsychologiques permettent de prédire les performances aux épreuves de discrimination et d'identification de la prosodie vocale. Selon leurs analyses, les mesures cognitives sélectionnées (évaluant les capacités de mémoire épisodique, de fonctionnement exécutif, et de perception visuelle) prédisent seulement faiblement les performances des adultes âgés aux épreuves paralinguistiques vocales. De manière plus précise, les performances cognitives prédisent respectivement 9 % et 22 % de la variance observée pour les épreuves de discrimination et d'identification de la prosodie émotionnelle. En ce qui concerne la prosodie non affective (reconnaissance du sarcasme), les performances cognitives des aînés permettent quant à elles de rendre compte de 17 % de la variance observée. Selon les auteurs, la contribution explicative de ces facteurs cognitifs est donc faible, et conséquemment, le traitement de la prosodie vocale s'appuierait sur l'utilisation de fonctions cognitives qui ne sont pas sollicitées par les tests sélectionnés pour l'étude.

Une étude ultérieure évalue quant à elle si les difficultés de reconnaissance de prosodie vocale observées chez les adultes âgés se maintiennent lorsque les niveaux d'intelligence cristallisée et de mémoire de travail sont contrôlés statistiquement (Mitchell, 2007). Lorsque les performances aux tâches sont comparées entre les participants jeunes et plus âgés, on retrouve à nouveau des scores plus faibles chez les adultes âgés. En outre, les deux mesures cognitives utilisées, sont toutes deux corrélées aux performances des adultes âgés. Néanmoins, le fait de contrôler statistiquement pour leur contribution n'annule nullement l'effet de l'âge. Cela suggère, selon l'auteur, que les difficultés de traitement de la prosodie vocale qui apparaissent avec l'âge ne sont pas secondaires au déclin des capacités cognitives sélectionnées dans l'étude et mesurées telles qu'elles l'ont été. Ces résultats concernant le lien entre intelligence cristallisée et difficultés de traitement paralinguistique vocal émotionnel survenant au cours du vieillissement sont corroborés par une étude ultérieure (Ryan, Murray & Ruffman, 2010). Cette dernière apporte par ailleurs de nouvelles informations à propos de la contribution de l'intelligence fluide dans l'installation de difficultés paralinguistiques vocales liées à l'âge, et les auteurs mettent en évidence une capacité prédictive plus importante des capacités d'intelligence fluide comparativement à celles d'intelligence cristallisées. Notons cependant que lorsque des auteurs considèrent uniquement les adultes âgés performant le moins bien, le fait de contrôler pour ces capacités annule la relation entre l'âge et le traitement paralinguistique, qui autrement est significative (Ruffman, Halberstadt & Murray, 2009). Ce résultat suggère que chez les aînés réussissant le moins bien aux tâches de traitement paralinguistique vocal, il est possible que des mécanismes autres que ceux présents lors du vieillissement optimal contribuent à cette contre-performance.

Dans une étude plus récente, deux chercheurs tentent de départager si les difficultés de reconnaissance des émotions véhiculées dans la voix observées chez les aînés sont un artéfact des demandes inhérentes aux tâches de discrimination utilisées ou bien si elles traduisent un réel déclin de ces capacités (Mitchell & Kingston, 2011). Le paradigme expérimental élaboré est ingénieux puisqu'il permet de réduire significativement les demandes cognitives sous-tendant l'exécution de la tâche. Ainsi, au lieu d'un protocole classique de discrimination dans lequel le participant entendrait un extrait sonore et sélectionnerait, parmi des choix, quelle émotion y est véhiculée, les auteurs mettent au point un paradigme de discrimination pareil/différent. De ce fait, des paires de stimuli (courtes phrases au contenu linguistique neutre) sont présentées et les

participants doivent indiquer si le contenu prosodique est le même pour les deux paires ou s'il est différent. Pour la tâche, deux prosodies affectives sont utilisées (joie et tristesse), ainsi que deux prosodies non affectives (tons déclaratif et interrogatif). Les performances des adultes jeunes et plus âgés sont ensuite comparées à l'aide d'une analyse de covariance (variables contrôles : estimé de l'intelligence cristallisée et sensibilité auditive à 1000 et 2000 Hz). Concernant le taux de bonnes réponses, l'effet principal du groupe s'est montré significatif et indique que tout en contrôlant pour le déclin auditif et le rendement cognitif, les adultes plus âgés font plus d'erreurs que les jeunes adultes. Concernant les temps de réaction, l'interaction groupes x tâches s'avère significative, indiquant que tout en contrôlant pour le déclin auditif et le rendement intellectuel global, les adultes plus âgés répondent plus lentement que les jeunes adultes, et que cet écart est plus marqué pour les stimuli contenant une prosodie émotionnelle. Ces résultats sont importants puisqu'ils suggèrent que le déclin des capacités de reconnaissance de la prosodie vocale observé au cours du vieillissement normal ne serait pas un artéfact du type de paradigme expérimental préconisé. De plus, indépendamment de la présence de difficultés cognitives typiques du vieillissement normal, l'âge semble bel et bien être associé à la mise en place d'un déclin spécifique des capacités à extraire de la voix les informations paralinguistiques qu'elle contient, que ces informations renseignent sur les intentions du locuteur ou encore sur son état émotionnel.

1.3.2.4 Synthèse : vieillissement cognitif & traitement paralinguistique vocal

En somme, il appert que les modifications touchant les capacités d'intelligence cristallisée ne jouent pas de rôle déterminant quant au déclin des capacités de traitement de la prosodie vocale survenant avec l'âge. Certaines études suggèrent toutefois que le déclin des capacités d'intelligence fluide pourrait contribuer à la baisse de performance des adultes âgés, principalement pour ceux performant le moins aux tâches paralinguistiques. La participation du déclin des capacités mnésiques, attentionnelles, de mémoire de travail ou exécutives dans l'apparition des difficultés de traitement paralinguistique vocal n'a cependant pas été démontrée de manière éloquente.

Avancer en âge semble donc s'accompagner d'une diminution intrinsèque des capacités de traitement de la prosodie vocale. En outre, ce déclin semble survenir indépendamment de la mise en place, au cours du vieillissement normal, d'altérations cognitives (telles que quantifiées dans les études antérieures) mais également de l'altération des seuils auditifs.

Afin de poursuivre dans la quête d'identification des causes induisant ce déclin de performances, l'étape suivante renvoie à l'organe qui contrôle tous les comportements humains, qu'ils soient sensoriels, émotionnels ou cognitifs : le cerveau.

1.3.3 LES MODIFICATIONS CÉRÉBRALES ANATOMOPHYSIOLOGIQUES & FONCTIONNELLES

1.3.3.1 Survol des changements neuroanatomiques et neurophysiologiques liés au vieillissement normal

1.3.3.1.1 Introduction

À la lumière des données actuelles, il serait téméraire de faire un lien de causalité direct entre la survenue des difficultés sensorielles et cognitives observées chez les adultes âgés et l'apparition d'altérations cérébrales liées à l'âge. Néanmoins, le cerveau constituant le substrat initial de l'ensemble des comportements, cette possibilité ne peut pas non plus être totalement exclue.

Certains auteurs ont ainsi émis l'hypothèse que la mise en place, avec l'âge, de changements cérébraux pourrait expliquer les difficultés de traitement paralinguistique vocal quantifiées chez les aînés (Broscole & Weisman, 1995; Orbelo, Testa & Ross, 2003; Sullivan & Ruffman, 2004; Fecteau et al., 2005; Mitchell, 2007; Ruffman Sullivan & Dittrich, 2009 & Ryan & Ruffman, 2010). Cependant, à notre connaissance, cette hypothèse n'a jamais été testée de manière expérimentale, et les auteurs susmentionnés abordent plutôt le problème en s'inspirant des données venant d'études évaluant l'impact de l'âge sur le traitement émotionnel des mimiques faciales. L'absence d'étude de neuroimagerie sur le sujet, ainsi que la généralisation au domaine paralinguistique vocal de patrons de résultats provenant de la modalité visuelle,

constituent deux faiblesses majeures de la littérature actuelle. Cette thèse tente justement de remédier à cette situation.

Avant de discuter des modifications cérébrales fonctionnelles liées à l'âge (qui représentent un des volets principal des études constituant cette thèse), il convient initialement d'aborder les changements structuraux cérébraux survenant lors du vieillissement normal, les altérations structurales et fonctionnelles étant vraisemblablement inter-reliées. La présente section est donc tout d'abord dédiée à la description sommaire des changements neuroanatomiques, neurophysiologiques et neurofonctionnels étant classiquement retrouvés au cours du vieillissement normal (pour revue, p. ex. voir Beason-Held & Horwitz, 2002 ou Greenwood, 2007). Dans un second temps, ces modifications sont considérées en relation avec les études suggérant qu'elles jouent un rôle déterminant dans le déclin des capacités de traitement paralinguistique vocal des adultes âgés. En l'absence d'études empiriques, les hypothèses réflexives des auteurs, qui mettent en relation les difficultés de traitement paralinguistique vocal et les modifications cérébrales anatomophysiologiques ou fonctionnelles, sont plutôt présentées.

1.3.3.1.2 Changements anatomophysiologiques

Avant de s'intéresser à l'impact du vieillissement normal sur la manière dont les différentes régions cérébrales travaillent ensemble, les principaux changements cérébraux survenant au niveau structurel sont brièvement décrits. Cela permettra au lecteur d'avoir une idée plus intégrative et plus représentative des altérations touchant l'encéphale avec l'âge, et ainsi d'être plus à même de comprendre les éléments présentés dans le chapitre III de cette thèse.

Niveau macroscopique

Les études observent la présence de changements volumétriques cérébraux au cours du vieillissement normal. La masse cérébrale commencerait à décroître à partir de la troisième ou de la quatrième décennie, et ce déclin progresserait lentement avec l'âge. L'essentiel de cette perte

volumétrique surviendrait toutefois après l'âge de 55 ans, et ne toucherait pas de manière homogène les différentes composantes de l'encéphale (pour revue, voir Beason-Held & Horwitz, 2002).

Avant l'âge de 50 ans, l'atrophie observée toucherait ainsi principalement le cortex cérébral (ou matière grise, c.-à-d. le tissu formé des corps neuronaux, d'interneurones et de cellules gliales), alors qu'après cet âge, ce serait essentiellement la substance blanche (combinaison d'axones et de cellules gliales) qui serait affectée. Au niveau cortical, soulignons que ces pertes volumétriques toucheraient surtout les régions cérébrales temporales, pariétales et frontales, ces dernières étant les plus affectées au cours du vieillissement (pour revue, voir Beason-Held & Horwitz). Au niveau sous-cortical, le vieillissement normal s'accompagnerait également de l'apparition d'hypodensités touchant la substance blanche. Ces anomalies seraient causées par des changements non spécifiques de la matière blanche, et correspondraient à des zones démyélinisées (c.-à-d. formées d'axones ayant perdu une partie de leur gaine de myéline, une enveloppe protéinique permettant de favoriser la transmission de l'influx nerveux). Ainsi, entre l'âge de 30 et de 80 ans, la prévalence de ces hypodensités passerait de 25 à 75 %. Les régions cérébrales qui seraient les plus affectées par ces anomalies seraient les zones péri-ventriculaires frontales et occipitales (pour revue, voir Beason-Held & Horwitz, 2002).

Niveau microscopique

Contrairement à ce qui était cru auparavant, il n'y aurait pas de perte neuronale généralisée lors du vieillissement normal. Les changements affecteraient plutôt la nature des neurones. Ainsi, une diminution de la quantité de grands neurones surviendrait parallèlement à l'augmentation du nombre de petits neurones. Néanmoins, une perte neuronale localisée peut être présente pour certaines régions cérébrales sous-corticales, principalement le thalamus, l'hippocampe et la substance noire.

Les études indiquent également que le milieu environnant des neurones subirait certains changements au cours du vieillissement. Au niveau du milieu extracellulaire, on pourrait observer entre autres l'apparition de plaques séniles, c'est-à-dire des agglutinats denses de protéines formant des plaques. Des amas protéiniques similaires sont généralement retrouvés lors de

certaines maladies neurodégénératives, principalement lors du trouble neurocognitif sévère dû à la maladie d'Alzheimer (TNS-A). Néanmoins, la constitution chimique de ces dernières diffèrerait légèrement (pour revue, voir Beason-Held & Horwitz, 2002).

Au niveau cytoplasmique, c'est-à-dire le milieu interne de la cellule, des différences entre les neurones d'adultes jeunes et plus âgés sont également observées. L'accumulation intracellulaire de structures protéiniques pourrait être observée pour les adultes plus âgés (p. ex., les corps de Lewy ou les dégénérescences neurofibrillaires). Notons que ces éléments sont également retrouvés lors de certaines pathologies neurodégénératives, le corps n'arrivant plus à les détruire et à les éliminer (pour revue, voir Beason-Held & Horwitz, 2002).

1.3.3.1.3 Synthèse : Vieillesse anatomophysiologique

Le cerveau de l'adulte âgé est donc structurellement distinct de celui du jeune adulte. L'ensemble des modifications macro et microscopiques y prenant place serait généralement d'intensité légère à modérée lors du vieillissement normal et n'interfèrerait par forcément avec le fonctionnement quotidien des aînés. Cette nuance distingue ces anomalies histologiques de celles présentes lors de pathologies neurodégénératives, qui sont plus nombreuses et sont observées chez des adultes dont le fonctionnement est contraint de façon telle, qu'un trouble cognitif sévère (ou un état démentiel) est alors reconnu.

Sans aller jusqu'à interférer avec le niveau de performance des adultes âgés normaux, ces modifications pourraient néanmoins altérer la manière dont l'information est traitée par le cerveau. Ce postulat est abordé dans la section suivante.

1.3.3.2 Survol des changements neurofonctionnels liés au vieillissement normal

1.3.3.2.1 Introduction technique : Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle

Avant de présenter les travaux ayant objectivé la présence de changements liés à l'âge, au niveau des réseaux neuronaux sous-tendant divers comportements cognitifs, il semble judicieux de donner quelques précisions concernant la principale technique à l'aide de laquelle

ces modifications ont été mises en évidence, soit l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf). Les devis expérimentaux ayant été utilisés dans un des articles empiriques de ce travail sont également brièvement abordés.

Fondements physiques sous-tendant l'IRMf

Il ne serait pas faux de dire qu'à lui seul, l'avènement de l'IRMf a créé ce qui peut s'apparenter à une petite révolution au sein du domaine des neurosciences. En effet, contrairement à son prédécesseur, la tomographie par émission de positrons (TEP), qui elle nécessite l'injection de marqueurs radioactifs, la venue de l'IRMf permet désormais d'avoir accès de manière non invasive à la façon dont le cerveau fonctionne lors de l'exécution de tâches cognitives. L'imagerie par résonance magnétique, qu'elle soit anatomique ou fonctionnelle, est ainsi possiblement l'une des technologies les plus utilisées afin d'étudier *in vivo* et de manière non invasive le cerveau et son fonctionnement. Sans entrer inutilement dans les détails théoriques, il semble tout de même important de mentionner que cette technique permet, grâce à la production d'un champ magnétique artificiel de forte intensité, couplé à l'émission de radiofréquences spécifiques, la visualisation des différents tissus composant l'encéphale (IRM) ainsi que de l'activité cérébrale (IRMf).

L'apport novateur de l'IRMf réside donc dans le fait qu'elle donne un accès non invasif et en temps réel à la manière dont différentes régions cérébrales travaillent afin d'exécuter une tâche. L'activité cérébrale n'est toutefois pas mesurée directement, mais bien par l'intermédiaire d'un mécanisme nommé couplage neurovasculaire. Des études de neurochirurgie datant du 19^e siècle observent ainsi que lors d'un traitement cognitif, l'apport régional en sang (quantifié par le niveau local de vasodilatation) varie en lien avec les changements d'activité chimique des tissus cérébraux avoisinants. De nos jours, l'estimation de l'activité cérébrale à l'aide de l'IRMf s'appuie sur ces observations, et la variable la plus couramment utilisée est le signal *BOLD* (*blood oxygenation level dependant*). Ce signal dépend donc intrinsèquement de la réponse hémodynamique cérébrale. Il rend compte des variations du taux d'oxygénation de l'hémoglobine survenant suite à la présentation d'un stimulus. En effet, cette protéine, qui est située à l'intérieur des globules rouges et qui assure la circulation sanguine de l'oxygène,

possède des propriétés magnétiques variables en fonction des concentrations d'oxygène qu'elle transporte. Plus une région cérébrale est sollicitée par une tâche, plus l'hémoglobine y transportera de l'oxygène. C'est donc à partir de la somme de tous les changements du signal *BOLD* au fil du temps, pour une tâche et un type de stimuli donné, que l'IRMf peut servir à modéliser l'activité cérébrale (pour revue, voir entre autres Amaro & Barker, 2006 ou Huettel, 2009).

Principaux devis expérimentaux utilisés en IRMf

La mise en évidence de l'implication sélective de réseaux neuronaux dans la réalisation de tâches cognitives nécessite que l'on s'intéresse à la variation de l'activité cérébrale régionale, en lien avec la présence et l'absence de la condition d'intérêt. Pour ce faire, il convient de sélectionner adéquatement le devis expérimental selon lequel les stimuli sont présentés. Par souci de concision, sont décrits ici uniquement les devis utilisés pour ce travail, à savoir le devis en blocs et le devis évènementiel.

- **Devis en blocs.** Ce paradigme se caractérise par la présentation groupée de plusieurs stimuli appartenant à une même condition expérimentale, formant ainsi ce qui est appelé un bloc de stimuli. Pour chacune des variables indépendantes sélectionnées, différents blocs sont créés. L'ensemble de ces blocs est ensuite présenté aux participants de manière séquentielle et aléatoire (ou pseudo-aléatoire), chacun étant séparé des autres par des intervalles de silence. Les images cérébrales sont enregistrées en synchronie avec les essais expérimentaux.

Ce type de paradigme permet de mesurer si, en comparaison à un niveau de base, l'activité d'une région cérébrale prédéterminée augmente lors de la présentation des stimuli cibles. Les avantages de ce devis sont qu'il permet d'objectiver un signal *BOLD* de forte amplitude, qu'il est robuste (bonne reproductibilité des résultats) et qu'il possède un bon pouvoir statistique.

- **Devis évènementiel.** Contrairement au devis précédent, les stimuli ne sont plus ici présentés de manière groupée, mais plutôt isolément, un à la fois. Ce paradigme permet ainsi de

présenter séparément les différentes conditions d'une même variable indépendante. Les réponses cérébrales sont quant à elles enregistrées à différents moments de la tâche, ce qui permet de reconstruire la réponse hémodynamique cérébrale, et ce pour chaque condition expérimentale. Ce type de paradigme permet de mesurer, pour une région cérébrale d'intérêt, l'intensité de la variation du signal *BOLD* pour une condition donnée et en fonction du temps.

Le principal avantage de ce devis est qu'il permet l'étude de divers aspects d'un seul et même événement. Par exemple, de comparer les activations associées à la production de bonnes réponses à celles découlant de la production de mauvaises réponses.

Afin de mettre en évidence les activations cérébrales spécifiques à la question expérimentale, il convient par la suite de comparer statistiquement, pour les groupes expérimentaux, les signaux *BOLD* enregistrés lors des différents traitements cognitifs. Le détail de ces analyses statistiques étant consigné dans la section méthodologique du second article de cette thèse, le lecteur peut se référer au chapitre II du présent travail s'il souhaite avoir plus de précision sur le sujet.

1.3.3.2.2 Réorganisation fonctionnelle cérébrale lors du vieillissement normal

Au cours du vieillissement normal surviennent des changements anatomophysiologiques qui affectent la manière dont le cerveau travaille. De ces altérations découleraient une réorganisation de la manière dont les différentes régions cérébrales collaborent entre elles, induisant possiblement la mise en place de réseaux neuronaux distincts pour les adultes jeunes et plus âgés. L'avancée des outils technologiques permettant d'étudier le cerveau de manière *in vivo* et en temps réel, principalement l'IRMf et la TEP, a permis de mettre en évidence, de manière indirecte, l'activité de l'encéphale. Ces techniques permettent ainsi de comparer l'activité cérébrale d'adultes jeunes et d'ânés, et conséquemment de montrer certaines différences au niveau des réseaux neuronaux sollicités par les deux groupes.

Lors de la réalisation de certaines tâches, il semblerait que les réseaux neuronaux recrutés par les adultes âgés soient parfois distincts de ceux recrutés par les adultes plus jeunes,

suggérant que des phénomènes de plasticité cérébrale seraient présents au cours du vieillissement. Si l'on part de l'hypothèse que le vieillissement cérébral normal mène à une réduction de l'efficacité cognitive (cf. section 1.3.2 pour un rappel), la présence de ces phénomènes de plasticité revêt une importance toute particulière, puisqu'ils pourraient survenir en réponse au déclin du rendement cognitif.

Selon les études, deux principales hypothèses de réorganisation fonctionnelle du cerveau âgé ont actuellement préséance. Il semble pertinent de les présenter ici, puisque les résultats de l'étude de neuroimagerie réalisée dans le cadre de ce travail sont interprétés à la lumière de ces différents modèles et hypothèses.

Réorganisation inter-hémisphérique — réduction de l'asymétrie de l'activité cérébrale : le modèle HAROLD

À partir de données IRMf comparant les activations cérébrales d'adultes jeunes et âgés lors d'une tâche de rappel en mémoire verbale, Cabeza observe une augmentation de la bilatéralisation de l'activité du cortex préfrontal (CPF) chez le groupe de participants âgés (Cabeza, 2002). Alors que le fait d'encoder et de récupérer une information en mémoire élicite respectivement une activité du CPF droit et gauche chez les jeunes adultes, des activations préfrontales bilatérales peuvent être observées chez les aînés lors de ces mêmes tâches. À partir de ces ensembles de données, Cabeza propose le tout premier modèle de réorganisation neurofonctionnel, qu'il nomme HAROLD (*Hemispheric Asymmetry Reduction in OLDER adults*), en lien avec la diminution de l'asymétrie des patrons d'activité cérébrale lors du vieillissement normal. Ce réaménagement des réseaux neuronaux avec l'âge, impliquant la réduction de l'asymétrie présente chez les jeunes adultes, a été corroboré par plusieurs autres études (entre autres, De Sanctis et al., 2008, Naccarato et al., 2006 ou Cappell et al., 2006).

Par ailleurs, certains travaux suggèrent que cette différence de patron d'activation au niveau du CPF entre les sujets jeunes et âgés ne serait pas dépendante du type de tâche. En effet, un tel recrutement contralatéral de régions homologues serait également observé pour des épreuves de mémoire de travail, d'inhibition, de perception des visages, mais également de traitement de mots (pour revue, voir Hommet et al., 2008). Le modèle HAROLD semble donc

pouvoir être généralisé à des traitements cognitifs autres que la mémorisation. En outre, il pourrait également être observé ailleurs qu'au niveau du CPF, et des modifications similaires sont aussi recensées pour les régions temporales et pariétales (Grady et al., 1994 & 1997; Bellis, Nicol, et Kraus, 2000).

Réorganisation intra-hémisphérique — renversement postéro-antérieur de l'activité cérébrale: l'hypothèse PASA

Un second patron de réorganisation fonctionnelle cérébrale en fonction de l'âge est décrit dans la littérature, et il se caractérise quant à lui par un déclin de l'activité des voies ventrales, observé conjointement au recrutement additionnel de régions du CPF (Davis et al., 2008). Conséquemment, les auteurs nomment ce patron de réorganisation PASA (*Posterior-Anterior Shift in Aging*). La toute première étude décrivant ce phénomène utilise la TEP pour évaluer l'impact du vieillissement sur les réseaux neuronaux impliqués dans le traitement d'informations visuelles (Grady et al., 1994). Leurs données comparatives montrent que les jeunes adultes présentent davantage d'activation que les aînés au niveau des régions occipitales (régions postérieures de l'encéphale), mais également que les adultes âgés présentent une activité plus importante au niveau des régions préfrontales (régions cérébrales antérieures). Si l'on en croit ces données, un déplacement des activations cérébrales de l'arrière vers l'avant surviendrait au cours du vieillissement. À l'aide de l'IRMf, une étude de 2008 teste quant à elle l'hypothèse que ce schéma de réorganisation du cerveau vieillissant puisse être généralisée à d'autres traitements cognitifs (Davis et al., 2008). À cet effet, des tâches de mémoire épisodique et de perception visuelle sont utilisées, et les performances comportementales ainsi que les activations d'adultes jeunes et âgés sont comparées. Au niveau comportemental, les deux groupes obtiennent des performances similaires. Toutefois, lorsque l'activité cérébrale des deux groupes est comparée, les participants jeunes présentent plus d'activité au niveau occipital. Quant au groupe d'aînés, une activité accrue au niveau frontal est présente. Les données de cette étude vont donc dans le sens de l'étude de Grady et collaborateurs (1994), et renforcent l'hypothèse d'un possible déplacement de l'activité cérébrale vers les régions plus antérieures durant le vieillissement normal.

Hypothèses causales sous-tendant ces patrons de réorganisation fonctionnelle cérébrale

En fonction de ce qui a été précédemment mentionné, il apparaît indéniable qu'avec l'âge, la cartographie de l'activité cérébrale peut se modifier. Néanmoins, une question cruciale subsiste : quelle est la nature exacte des phénomènes induisant cette réorganisation? Il est actuellement difficile de statuer de manière définitive à ce sujet. À nouveau, considérant l'hypothèse que le vieillissement cérébral normal induit une réduction de l'efficacité cognitive, deux hypothèses causales ont été suggérées. La présence de réorganisation cérébrale avec l'âge pourrait ainsi découler de la mise en place de processus de compensation ou de dédifférenciation.

Plus spécifiquement, l'hypothèse compensatoire suggère que le recrutement, par les adultes âgés, de régions additionnelles (soit contralatérales ou plus antérieures) ou encore de réseaux totalement distincts de ceux mis en place par les jeunes adultes, rendrait compte d'une tentative de réaménagement neural ayant pour objectif de maintenir un certain niveau d'efficacité (pour revue, voir Stern, 2009).

L'hypothèse de dédifférenciation suggère quant à elle que le vieillissement normal serait accompagné d'une réduction de la capacité à solliciter des réseaux neuronaux spécialisés, et qu'en conséquence, le recrutement de régions cérébrales additionnelles, non spécifiques à la tâche, serait nécessaire (entre autres, Li & Lindernberger, 1999).

Si l'on suit la logique de ces hypothèses, la première permettrait vraisemblablement aux aînés de maintenir un niveau de performances comparable à celui de jeunes adultes, alors que selon la seconde, les performances des adultes âgés pourraient être inférieures à celles des jeunes. Il est toutefois essentiel de souligner que ces deux hypothèses ne sont absolument pas inconciliables et qu'il est fort vraisemblable que ces processus coexistent au sein d'un même cerveau (Cabeza, 2001).

Impact de la complexité sur la réorganisation fonctionnelle: l'hypothèse CRUNCH

Les patrons de réorganisation cérébrale liés au vieillissement décrits précédemment ne sont pas observés de manière systématique. Ainsi, au niveau interhémisphérique, Weissman, Banich & Puente (2000) montrent à l'aide d'une tâche d'appariement de lettres qu'une augmentation de la bilatéralité des activations est uniquement présente chez les adultes âgés lors de la réalisation de tâches ayant un niveau de difficulté élevé. Selon les auteurs, l'accroissement du réseau neuronal à des structures homologues controlatérales serait nécessaire exclusivement lors de la réalisation efficace de tâches complexes, et serait donc de nature compensatoire.

Au niveau intrahémisphérique, le niveau de complexité des tâches affecte également les patrons d'activité cérébrale observés chez les adultes âgés, et plus le niveau de complexité d'une tâche est élevé, plus l'activité des régions frontales serait importante. Afin de modéliser ce phénomène, Reuter-Lorenz et Cappell (2008) suggèrent une hypothèse de compensation neurale : *Compensation-Related Utilization of Neural Circuits Hypothesis* (CRUNCH). Selon cette hypothèse, le cerveau âgé contrerait les difficultés de traitement de l'information induites par le vieillissement en recrutant des réseaux neuronaux additionnels, lui permettant ainsi de maximiser ses chances de produire une réponse optimale. Chez les participants âgés, cette extension des ressources neuronales se mettrait en place pour des tâches peu complexes. Au fur et à mesure que le niveau de complexité de la tâche augmenterait, les ressources du cerveau âgé se raréfieraient, jusqu'à ce qu'il ne soit plus possible d'étendre davantage le réseau neuronal, ce qui induirait une baisse des performances pour les tâches plus complexes. Selon cette hypothèse et pour une tâche donnée, les adultes âgés recruteraient, à de faibles niveaux de complexité, des régions cérébrales que les jeunes adultes solliciteraient à des niveaux de complexité plus élevés. Certaines études ayant manipulé le niveau de complexité de tâches pour ensuite comparer les performances d'adultes jeunes et plus âgés vont dans le sens de cette hypothèse (Cappell, Gmeindl & Reuter-Lorenz, 2010; Mattay et al, 2006).

1.3.3.2.3 Synthèse : vieillissement normal & réorganisation cérébrale fonctionnelle

En somme, le cerveau vieillissant subit de nombreux changements anatomophysiologiques qui altèrent sa structure et son fonctionnement. Lors du vieillissement normal, il préserve néanmoins une certaine plasticité et les réseaux neuronaux semblent être en mesure de s'adapter à ces changements en s'étendant, que ce soit de manière intra ou inter-hémisphérique. Ces phénomènes favoriseraient la préservation de performances cognitives adéquates, mais ce maintien ne pourrait durer indéfiniment. Ainsi, lorsque la complexité inhérente à une tâche s'avère trop grande, il s'en suivrait inévitablement un déclin de la performance des adultes âgés en comparaison à celles de jeunes adultes et ce, malgré la présence de réseaux neuronaux plus étendus.

1.3.3.3 Réorganisation cérébrale lors du vieillissement & traitement paralinguistique vocal

1.3.3.3.1 Vieillesse normale & traitement paralinguistique

Certains auteurs suggèrent que les modifications cérébrales neuroanatomiques ou neurofonctionnelles liées à l'âge pourraient jouer un rôle déterminant dans le déclin des capacités de traitement de la prosodie vocale paralinguistique observé lors du vieillissement normal. Ces propositions, qui sont essentiellement avancées afin de rendre compte des difficultés de traitement paralinguistique vocal émotionnel, ciblent ainsi des régions cérébrales dont dépend le traitement émotionnel (p. ex. l'amygdale), et transposent à la modalité vocale des résultats observés lors du traitement d'informations émotionnelles faciales. Mentionnons tout de même que pour la plupart, ces travaux suggèrent qu'un recrutement de régions additionnelles surviendrait au cours du vieillissement, et ce dans une visée compensatoire.

Actuellement, il est cependant impossible de conclure de manière définitive quant à l'implication des modifications cérébrales fonctionnelles dans la survenue de difficultés de traitement paralinguistique vocal en général, d'une part étant donné l'absence d'étude empirique à ce sujet, et d'autre part, du fait que les hypothèses explicatives suggérées concernent systématiquement les stimuli de nature émotionnelle. Dans cette thèse, le problème

est abordé selon un angle plus large, en se détachant de la sphère affective, mais également en s'intéressant aux régions corticales impliquées sélectivement dans le traitement de la voix (entre autres, Belin et al., 2000).

Dans cette section, les hypothèses traçant un lien entre difficultés de traitement paralinguistique vocal et modifications cérébrales survenant toutes deux avec l'âge, sont décrites. Tout d'abord, la seule étude suggérant l'impact des altérations anatomophysiologiques sur ces capacités est rapportée, suivie de la présentation des études proposant plutôt la contribution de modifications cérébrales fonctionnelles.

Impact des modifications cérébrales anatomophysiologiques

Broscole et Weisman (1995) émettent l'hypothèse que les difficultés de traitement de la prosodie vocale objectivées chez leur groupe d'adultes âgés pourraient être liées à la prolifération, avec l'âge, de plaques séniles au niveau du milieu extracellulaire (voir section 1.3.3.1.2 de ce chapitre pour rappel). Pour formuler cette hypothèse, les auteurs se basent sur une étude évaluant, chez des adultes âgés de plus de 50 ans, les liens entre la densité de plaques séniles (telle que mesurée par un examen *post-mortem*) et divers symptômes cliniques indicateurs d'un trouble de santé mentale (Kurucz, et al., 1981). Selon Broscole et Weisman, il serait envisageable que les difficultés de traitement de la prosodie vocale (ce qu'ils nomment agnosie prosopo-affective) soient liées à l'accumulation pathologique de plaques séniles au niveau extracellulaire. La présence de ces atypies serait très fréquentes lors d'un TNS-A, et une agnosie prosopo-affective ferait également partie du tableau clinique de ce trouble. Il est toutefois difficile de statuer quant à cette hypothèse puisqu'à ce jour, aucune étude n'a tenté de valider le rôle de la présence de plaques séniles dans le déclin du traitement de la prosodie vocale, que ce soit avec des adultes âgés sains ou présentant un TNS. Mentionnons néanmoins qu'à défaut de rendre compte à elle seule de la survenue des difficultés de traitement paralinguistique vocal liées au vieillissement normal, la présence de plaques séniles pourrait vraisemblablement contribuer à leurs apparitions

Impact des modifications cérébrales fonctionnelles

Certains auteurs émettent quant à eux l'hypothèse qu'une réorganisation cérébrale fonctionnelle survenant avec l'âge pourrait jouer un rôle dans l'apparition de difficultés de traitement de la prosodie vocale, principalement lorsqu'elle véhicule de l'information de nature émotionnelle (Orbelo, Testa & Ross, 2003; Sullivan & Ruffman, 2004; Fecteau et al., 2005; Mitchell, 2007; Ruffman Sullivan & Dittrich, 2009 & Ryan & Ruffman, 2010). Comme il est mentionné précédemment, ces auteurs se sont grandement inspirés des résultats mettant de l'avant la présence d'une réorganisation fonctionnelle lors de la reconnaissance d'émotions faciales, se basant sur l'assomption que l'organisation des régions corticales sensorielles s'effectue de manière similaire, peu importe la modalité (Ellis, 1989). Ils suggèrent ainsi que des phénomènes de plasticité seraient présents pour les réseaux neuronaux sous-tendant le traitement de la prosodie vocale, et ils s'inspirent de la littérature des visages pour extrapoler les types de changements neurofonctionnels qui pourraient être présents. Selon cette littérature, les adultes âgés recrutent essentiellement les régions temporales et pariétales lors d'une tâche de discrimination de valence émotionnelle faciales, alors que les jeunes adultes présentent plutôt des activations au niveau des régions occipitales et limbiques. Lorsque ces activations sont comparées en intragroupe avec celles résultant d'une tâche non émotionnelle (jugement d'âge des visages), les chercheurs observent que les jeunes adultes présentent une activité significative au niveau de l'amygdale et des régions limbiques avoisinantes, alors que les aînés présentent plutôt des activations au niveau des régions frontales (Gunning-Dixon et al., 2003). Ce déclin avec l'âge de l'activation des régions limbiques secondaire au traitement émotionnel facial est retrouvé dans d'autres études, principalement au niveau de l'amygdale, de l'hippocampe et du gyrus parahippocampique (Grady et al., 1995; Lidaka et al., 2002).

Conséquemment, en ce qui a trait aux capacités de traitement paralinguistique vocal émotionnel, certains auteurs proposent que le déclin volumétrique et métabolique au niveau de certaines structures du système limbique et du cortex orbito-frontal observé de manière générale au cours du vieillissement normal puisse avoir un impact délétère (Sullivan & Ruffman, 2004; Ruffman Sullivan & Dittrich, 2009 & Ryan & Ruffman, 2010). Certains auteurs font par ailleurs l'hypothèse fonctionnelle que le déclin d'activation des régions temporales médianes (régions limbiques) ainsi que l'accroissement d'activation au niveau du cortex frontal observé

dans la littérature des visages seraient également retrouvés lors du traitement de la prosodie vocale affective (Fecteau et al., 2005; Ryan & Ruffman, 2010). Il est ainsi suggéré que le recrutement additionnel des régions frontales permettrait de compenser la diminution métabolique des régions spécialisées dans le traitement émotionnel, à savoir les régions limbiques (Ryan & Ruffman, 2010).

La comparaison entre jeunes adultes et patients cérébro-lésés permet d'apporter des informations supplémentaires quant au lien unissant les difficultés de reconnaissance de la prosodie affective et les modifications cérébrales liées à l'âge. Selon certains auteurs, ces difficultés pourraient s'apparenter à ce qui peut être observé lors de lésions cérébrales droites. Par conséquent, les difficultés liées au vieillissement pourraient résulter d'un dysfonctionnement plus marqué de l'hémisphère droit (HD; Orbelo, Testa & Ross, 2003; Mitchell, 2007). Orbelo, Testa et Ross (2003) observent ainsi que les adultes âgés performant mieux à une tâche de reconnaissance de prosodie émotionnelle vocale lorsque les stimuli sont langagiers (p. ex., pour les mots et les syllabes en comparaison aux intonations), un traitement sous-tendu principalement par l'hémisphère gauche (HG). Par ailleurs, afin de réaliser des tâches d'identification de prosodies émotionnelles, les participants âgés se basent principalement sur les informations temporelles contenues dans les stimuli, un traitement qui dépendrait également de l'intégrité de l'HG. Afin de valider l'hypothèse d'une éventuelle contribution d'un dysfonctionnement de l'HD dans la survenue de difficultés de traitement paralinguistique vocale au cours du vieillissement normal, les auteurs comparent le profil de performance à des tâches de reconnaissance de prosodie affective d'adultes jeunes, d'âge moyen et d'aînés, à celui d'adultes ayant subi une lésion cérébrale droite ou gauche. Malgré le fait que les performances des adultes âgés soient meilleures que celles des adultes cérébro-lésés droit, leurs deux courbes de performances sont très comparables. Les participants aînés, tout comme les adultes ayant une lésion cérébrale droite, présentent un maximum de difficultés lorsque les stimuli à traiter contiennent peu d'information articulatoire, et qu'ils doivent donc solliciter davantage l'HD afin d'effectuer la tâche. En plus de suggérer un déclin de l'intégrité de l'HD avec l'âge, ces résultats font également émerger la possibilité que les adultes âgés puissent avoir recours à des stratégies cognitives différentes de celles mises en place par les jeunes adultes, ce qui, au final, pourrait induire des patrons d'activations cérébrales distincts pour les deux groupes d'âge.

1.3.3.3.2 Synthèse : vieillissement cérébral & traitement paralinguistique vocal

En somme, plusieurs auteurs s'entendent sur le fait que la survenue de modifications cérébrales liées à l'âge contribuerait à l'apparition des difficultés de traitement de la prosodie vocale affective. Ces changements toucheraient, selon les hypothèses recensées dans la littérature, les régions cérébrales spécialisées dans le traitement émotionnel (c.-à-d., le système limbique) ou encore le l'hémisphère droit en général. Un point semble cependant lacunaire : alors que la littérature des visages met en exergue des modifications fonctionnelles associées à l'âge touchant les structures spécialisées dans le traitement de ces stimuli (entre autres, Lee et al., 2011), aucun auteur ne parle du penchant auditif de ces régions, soit les aires vocales temporales (AVT). Or la question apparaît cruciale, puisque des modifications neurofonctionnelles de l'activité des aires spécialisées dans le traitement de la voix en général pourraient contribuer aux difficultés de traitement de la prosodie vocale, qu'elle contienne de l'information émotionnelle ou non.

1.4 AIRES CÉRÉBRALES SPÉCIFIQUES AU TRAITEMENT VOCAL

Comme il est signalé d'entrée de jeu, la voix humaine ne peut être considérée comme un stimulus auditif ordinaire. Tant par la fréquence à laquelle l'Homme y est exposé que par sa contribution au bon fonctionnement de nos relations sociales, la voix humaine tient une place bien à part dans notre environnement auditif. Il peut ainsi paraître légitime qu'au niveau cérébral, certaines régions corticales soient impliquées sélectivement dans le traitement de ce stimulus tout à fait particulier (pour revue, voir Belin et al., 2011).

1.4.1 AIRES VOCALES TEMPORALES

C'est au début des années 2000 que l'existence d'aires cérébrales répondant de manière préférentielle à la voix humaine a été révélée pour la toute première fois (Belin et al., 2000). À l'aide de l'IRMf, ces chercheurs observent que les régions situées le long du sillon temporal supérieur (STS) gauche et droit semblent être préférentiellement activées lorsque l'on soustrait les activations résultant de la présentation des sons de l'environnement à celles induites par des

stimuli vocaux (cf. Figure 2). La spécificité des aires antérieures du STS droit pour l'analyse de sons vocaux non linguistiques, par exemple des pleurs, des rires, des gémissements, etc. est également démontrée (Belin, Zatorre & Ahad, 2002), et ces auteurs proposent que les régions antérieures du STS droit seraient impliquées dans la perception des paramètres paralinguistiques véhiculés par la voix.

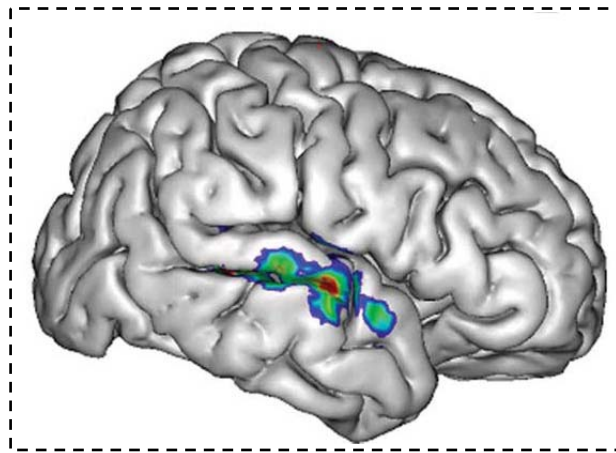


Figure 2. Aires vocales temporales (AVT)

Régions corticales présentant, chez des adultes jeunes, une réponse hémodynamique supérieure lors du contraste vocal vs non vocal. Les AVT sont localisées le long des parties antérieures et médianes du sillon temporal supérieur (STS), et ce bilatéralement (*adaptée de Belin et al., 2006*).

Cette spécificité des régions corticales situées le long du STS pour le traitement de la voix humaine est confirmée par plusieurs études (entre autres, Kriegstein & Giraud, 2004; Belin et al, 2004; von Kriegstein et al., 2005; Belin, 2006; Warren et al., 2006, et pour revue, voir Patterson & Johnsrude, 2008 & Belin et al., 2011), tout comme celle des régions droites pour le traitement des informations vocales non linguistiques (entre autres, Grandjean et al., 2005; Ethofer et al., 2007). En raison de la présence de cette réponse sélective à la voix, ces régions sont conséquemment nommées les aires vocales temporales (AVT).

Au niveau ontogénétique, une étude récente montre que la sélectivité vocale des AVT serait présente dès l'âge de sept mois (Grossman et al, 2010). Ce résultat suggère que bien avant que le langage soit complètement développé, le cerveau de l'enfant serait en mesure de discriminer et de reconnaître les informations vocales. Mentionnons que la présence de régions

cérébrales spécialisées dans le traitement de la voix ne serait pas circonscrite à l'humain. Des zones similaires sont ainsi recensées chez le macaque (Petkov et al., 2008), ce qui suggère que, d'un point de vue phylogénétique, la présence d'AVT (ou d'aires cérébrales fonctionnellement comparables) est ancienne, et a vraisemblablement facilité la survie et les interactions sociales des primates en permettant une reconnaissance plus optimale des vocalisations propres à l'espèce.

1.4.2 MODÉLISATION DU TRAITEMENT CÉRÉBRAL VOCAL

Les données présentées précédemment démontrent de manière non équivoque l'existence de régions corticales impliquées sélectivement dans le traitement de la voix. Ces régions, que l'on partage avec certains primates hominoïdes, se seraient par ailleurs développées il y a de cela plusieurs millions d'années. Ces données ne donnent toutefois pas d'informations concernant la manière dont le cerveau traiterait les différentes informations contenues dans la voix humaine. Afin d'apporter quelques éléments de solution à ce problème, des auteurs se sont inspirés d'un modèle de perception de l'information faciale (Bruce & Young, 1986) afin d'élaborer un modèle décrivant, chez l'adulte, les différentes étapes menant à la perception vocale (Belin, Fecteau & Bédard, 2004 & Belin et al., 2011). La présence de travaux effectués sur le sujet et ayant recueillis des données comportementales, neuropsychologiques et de neuroimagerie a en outre permis aux auteurs de proposer des réseaux cérébraux au sein desquels les différents processus du modèle auraient lieu (cf. Figure 3).

Considérant ce modèle, lorsque l'on entend une voix, elle serait tout d'abord traitée par les réseaux auditifs généraux, ceux qui transportent tous les types de stimuli auditifs de l'oreille au cerveau (noyau cochléaire, olive supérieure, colliculus inférieur, noyau géniculé médian et cortex auditif primaire). Suite à ce traitement perceptuel de bas niveau, les informations structurelles de la voix seraient analysées au niveau des régions corticales spécialisées dans le traitement de la voix : les AVT droite et gauche. L'information vocale serait ensuite analysée par trois voies cérébrales fonctionnellement distinctes, chacune étant spécialisée dans une analyse spécifique des informations vocales : 1) l'analyse du discours ; 2) l'analyse de l'affect, et 3) l'analyse identitaire du locuteur. Selon les auteurs de cette modélisation, ces voies cérébrales ne fonctionneraient pas de façon indépendante, mais interagiraient plutôt les unes avec les autres, permettant ainsi un traitement plus efficace et intégré de la voix.

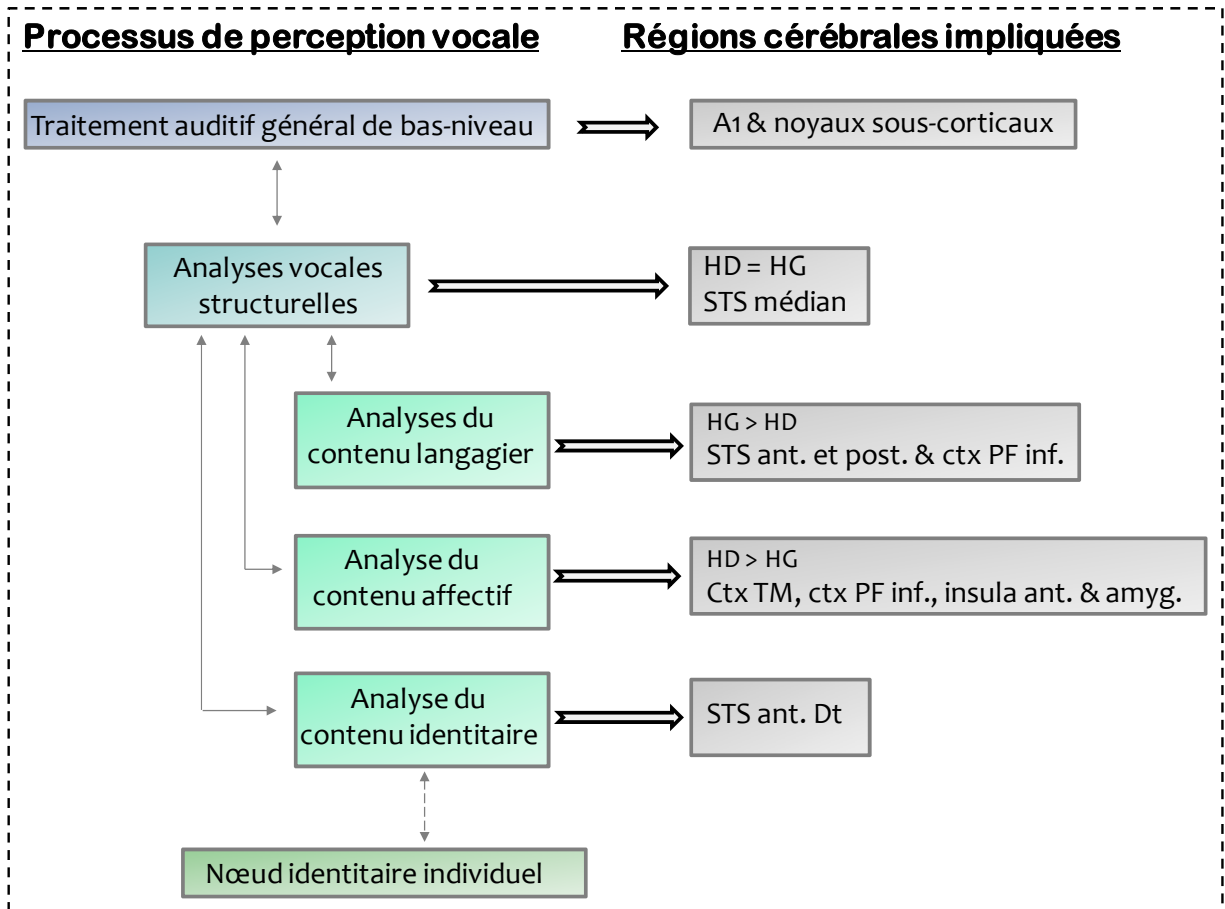


Figure 3. Modélisation de la perception vocale

Schématisation des différents processus permettant le traitement des informations vocales, ainsi que des régions cérébrales sous-tendant possiblement ces processus (*adapté de Belin, Fecteau & Bédard, 2004*).

Légende: A1: aires auditives primaires; HD: hémisphère droit; HG: hémisphère gauche; STS: régions entourant le sillon temporal supérieur; TM: temporal médian; PF: pré-frontal; ant.: antérieur; post.: postérieur; inf.: inférieur; ctx: cortex; amyg.: amygdale.

1.4.3 VIEILLISSEMENT NORMAL & AIRES VOCALES TEMPORALES

Les études ayant mené à l'identification des AVT sont essentiellement effectuées auprès d'une population d'adultes jeunes. Il en va de même pour les travaux desquels le modèle de Belin et collaborateurs (2004) a pu être schématisé. Tel que mentionné précédemment dans cette introduction, il n'existe aucune étude empirique ayant évalué l'impact du vieillissement normal sur les réseaux neuronaux sous-tendant le traitement de la prosodie vocale, ni s'étant

intéressées à l'impact du vieillissement normal sur les AVT. À la lumière des éléments mentionnés dans la présente section, il paraît tout à fait plausible d'envisager que les difficultés de traitement des informations paralinguistiques vocales des aînés, qu'elles soient de nature émotionnelle ou non, puissent être engendrées, entre autres choses, par une réorganisation cérébrale fonctionnelle survenant au niveau même de ces AVT.

1.5 PROBLÉMATIQUES & HYPOTHÈSES

Tout au long de cette introduction, la présence d'un déclin des capacités de traitement paralinguistique vocal au cours du vieillissement normal a été mise en évidence. La vaste majorité des études s'étant intéressées au sujet utilise toutefois des stimuli paralinguistiques vocaux très spécifiques, à savoir des vocalisations, des phrases ou des mots contenant de l'information de nature émotionnelle. Une seule étude a évalué spécifiquement l'impact du vieillissement normal sur le traitement de la prosodie vocale non affective, et celle-ci date de près de 30 ans (Linville & Korabic, 1986).

En parallèle, plusieurs auteurs proposent que la mise en place d'une réorganisation cérébrale fonctionnelle des réseaux neuronaux supportant le traitement paralinguistique puisse être à l'origine de la survenue des difficultés de traitement paralinguistique vocal au cours du vieillissement normal. Cependant, à notre connaissance, cette hypothèse n'a jamais été testée empiriquement. Tout comme aucune étude n'a exploré les conséquences du vieillissement normal sur le recrutement des AVT, ces régions corticales impliquées sélectivement dans le traitement de la voix en général.

L'objectif principal de cette thèse est donc de mieux comprendre l'impact du vieillissement normal sur les mécanismes comportementaux et cérébraux sous-tendant le traitement de la prosodie vocale non émotionnelle. De manière plus spécifique, ce travail a trois objectifs précis, chacun étant détaillé dans les sections subséquentes.

1.5.1 VIEILLISSEMENT NORMAL & TRAITEMENT PARALINGUISTIQUE VOCAL : DONNÉES COMPORTEMENTALES

- **Premier objectif : obtenir des données comportementales sur les capacités de traitement paralinguistique vocal non affectif lors du vieillissement normal.**

Le premier article répond à cet objectif (titre traduit : Vieillissement normal & traitement paralinguistique vocal : données comportementales).

Problématique

Considérant le fait qu'à ce jour, il existe un nombre très limité d'études s'étant intéressées à comparer les performances comportementales d'adultes jeunes et d'ânés lors du traitement de l'information paralinguistique vocale non affective, l'objectif principal de cet article est de pallier cette lacune.

Pour ce faire, deux groupes de participants sont constitués, l'un formé d'adultes jeunes et l'autres d'ânés (ayant plus de 60 ans). Les capacités de traitement de l'information paralinguistique vocale sont mesurées à l'aide d'une batterie informatisée mise au point pour cette étude : la batterie d'évaluation perceptuelle vocale (EPV ; en anglais, *Voice Perception Assessment (VPA)*). Cette batterie est constituée de quatre épreuves cognitives : deux tâches de discrimination, une tâche de catégorisation et une tâche de mémorisation. Deux des tâches de la batterie permettaient de comparer le traitement de stimuli vocaux et non vocaux, alors que les deux autres visaient la comparaison de stimuli vocaux naturels et modifié pour avoir une fo identique (permettant ainsi de tester l'importance de la fo dans le traitement de la voix). Les performances des deux groupes de participants à chacune de ces tâches sont comparées afin d'explorer l'hypothèse de l'impact négatif du vieillissement normal sur les capacités de traitement de l'information vocale.

Hypothèses

Le vieillissement normal semble être associé à un déclin des capacités de traitement de l'information paralinguistique non émotionnelle (Linville et Korabic, 1986; Allen & Brosgole, 1993; Allen & Brosgole, 1993). Ainsi, les hypothèses de travaille étaient les suivantes :

— Pour les tâches visant la comparaison du traitement des stimuli vocaux et non vocaux, les performances des participants âgés seront inférieures à celles des jeunes adultes. Cet écart sera plus marqué pour le traitement des stimuli vocaux que non vocaux.

— Pour les tâches visant la comparaison du traitement des stimuli vocaux naturels et modifiés, les performances des participants âgés seront inférieures à celles des jeunes adultes. Cet écart sera plus marqué pour le traitement des stimuli vocaux modifiés.

1.5.2 VIEILLISSEMENT NORMAL & TRAITEMENT PARALINGUISTIQUE VOCAL : DONNÉES DE NEUROIMAGERIE

- **Second objectif : étudier, lors du vieillissement normal, les réseaux neuronaux sollicités pour le traitement des stimuli vocaux.**
- **Troisième objectif : obtenir des données comportementales concernant les habiletés de discrimination paralinguistique vocale non affective au cours du vieillissement normal, ainsi qu'évaluer, à l'aide de l'imagerie (IRMf), l'impact de l'âge sur les réseaux neuronaux sous-tendant la réalisation d'une tâche de discrimination vocale.**
- **Quatrième objectif : Évaluer, pour les deux groupes d'âge, l'impact du niveau de complexité sur le recrutement des réseaux neuronaux lors de la tâche de discrimination vocale.**

Le second article traite de ces trois questions (titre traduit : Vieillissement normal & traitement paralinguistique vocal : données de neuroimagerie fonctionnelle).

Problématique

Tout comme ce qui est observé chez les adultes âgés lors du décodage des émotions faciales (Grady et al., 1995; Iidaka et al., 2002; Gunning-Dixon et al., 2003), il est suggéré qu'une réorganisation fonctionnelle des réseaux neuronaux sous-tendant le traitement de l'information paralinguistique vocale surviendrait au cours du vieillissement normal (entre autres, Mitchell, 2007; Ruffman Sullivan & Dittrich, 2009 & Ryan & Ruffman, 2010). Ces auteurs évoquent par ailleurs que cette réorganisation cérébrale prendrait part au déclin des capacités de traitement de la prosodie vocale survenant avec l'âge.

À notre connaissance, cette proposition n'a jamais été examinée empiriquement. L'objectif principal du second article de cette thèse est donc de tester l'hypothèse de la survenue d'une réorganisation cérébrale fonctionnelle avec l'âge lors du traitement d'informations paralinguistiques vocales non affectives.

À cet effet, une tâche adaptative de discrimination vocale a été élaborée. Les deux groupes de participants (adultes jeunes et âgés) ont eu à réaliser cette tâche alors qu'ils se trouvaient dans un scanner IRMf. Considérant l'hypothèse que lors du vieillissement normal, une extension des ressources neuronales serait nécessaire pour maintenir une certaine efficacité (CRUNCH ; Reuter-Lorenz, 2008), la tâche de discrimination utilisée comprend deux niveaux distincts de complexité. Le second article compile les résultats de deux études effectuées à l'aide de l'IRMf.

Hypothèses

La première de ces études vise à comparer, lors d'un paradigme d'écoute passive, les réseaux neuronaux sollicités pour le traitement des stimuli vocaux. Un intérêt particulier a été porté aux différences intergroupes quant aux activations des AVT.

Considérant les études suggérant la mise en place d'une réorganisation fonctionnelle avec l'âge lors du traitement de l'information paralinguistique vocale (entre autres, Mitchell, 2007; Ruffman Sullivan & Dittrich, 2009 & Ryan & Ruffman, 2010), il était attendu que :

— Les réseaux neuronaux élicités par la tâche d'écoute passive seraient distincts pour les adultes jeunes et les âgés.

Le premier objectif de la seconde étude présentée dans l'article est de comparer, pour des adultes jeunes et âgés, les performances comportementales lors d'une épreuve de discrimination pareil/différent de stimuli paralinguistiques vocaux non affectifs

Le vieillissement normal étant associé au déclin des capacités de traitement de l'information paralinguistique non émotionnelle (Linville et Korabic, 1986; Allen & Brosgole, 1993; Allen & Brosgole, 1993), l'hypothèse de travail était que :

— Indépendamment du niveau de complexité, les performances comportementales des jeunes adultes, telles qu'élicitées par les seuils de discrimination, devraient être meilleures que celles des aînés.

Le second objectif de cette étude est quant à lui de comparer, pour des adultes jeunes et âgés, les performances comportementales à une tâche de discrimination vocale ainsi que les réseaux neuronaux sous-tendant sa réalisation.

À nouveau, considérant les études suggérant la mise en place d'une réorganisation fonctionnelle avec l'âge lors du traitement de l'information paralinguistique vocale (entre autres, Mitchell, 2007; Ruffman Sullivan & Dittrich, 2009 & Ryan & Ruffman, 2010), les hypothèses sont que :

— Les adultes âgés devraient performer moins bien que les jeunes adultes lors de la discrimination de stimuli paralinguistiques vocaux.

— La discrimination de stimuli paralinguistiques vocaux devrait éliciter des réseaux neuronaux distincts chez les deux groupes d'âge.

Enfin, le troisième et dernier objectif de cette étude est d'examiner l'impact du niveau de complexité de la tâche sur les patrons d'activation élicités par les deux groupes d'âge.

En raison des effets délétères du vieillissement normal sur l'intégrité cérébrale, une extension des ressources neuronales est souvent observée chez les aînés, ce qui leur permettrait de maintenir des performances adéquates (CRUNCH ; Reuter-Lorenz, 2008). En ce sens, notre hypothèse était que :

— Les réseaux neuronaux mis en évidence pour les deux groupes d'âge seraient distincts pour le faible niveau de complexité, celui des participants âgés devant être plus étendus que celui des jeunes adultes.

CHAPITRE II

MÉTHODOLOGIE & RÉSULTATS

ARTICLE 1

**VOICE PERCEPTION ASSESSMENT:
IMPACT OF NORMAL AGING ON VOCAL PROCESSING**

Guyline Belizaire,^{a, b, c} Yves Joanette,^c Fanny-Maude Urfer,^b Cyril Pernet,^d
and Pascal Belin^{a, b, e, f}

^a Laboratoire de Neurocognition Vocale, Université de Montréal, Montréal, Canada

^b International laboratory for Brain, Music and Sound Research (BRAMS), Université de Montréal
& McGill University, Montréal, Canada

^c Centre de Recherche de l'Institut Universitaire de Gériatrie de Montréal (CRIUGM), Université
de Montréal, Montréal, Canada

^d Brain Imaging Research Centre, Neuroimaging Sciences, University of Edinburgh, Edinburgh,
United Kingdom

^e Voice Neurocognition Laboratory, Center for Cognitive Neuroimaging (CCNi) & Department of
Psychology, University of Glasgow, Glasgow, United Kingdom

^f Institut des Neurosciences de La Timone, UMR 7289, CNRS & Université Aix-Marseilles,
Marseilles, France

Soumis à Journal of speech, language and hearing research

SUMMARY

Purpose: To this day, the impact of normal aging on the processing of non affective paralinguistic information remains unclear. In this article, the issue was investigated by comparing the performances of 20 young and 16 older adults in vocal vs. non-vocal computerized tasks.

Method: Each participant performed a gender categorization task, an auditory source discrimination task, an adaptive discrimination task and a memory task, all part of the Voice Perception Assessment battery (VPA). In addition to these tasks, general cognitive and auditory declines were measured using respectively a cognitive screening test and pure tone audiometry.

Results: While controlling for cognitive and auditory decline, older adults were less efficient than younger participants for three of the four VPA tasks. However, a systematic age-related decline for vocal processing was not observed. While the performances could not be predicted by the cognitive measure selected as a control variable, it nevertheless appears that task demands participate in the age-related decline observed.

Conclusions: The processing of paralinguistic information being crucial to successful social interactions, a better understanding of the deleterious impacts of normal aging may have on those capacities is needed.

Key Words: voice processing, paralinguistic information, older adults, cognition, hearing

INTRODUCTION

NORMAL AGING & SPEECH PROCESSING IMPAIRMENT

During normal aging, modifications of the nervous system are observed, leading to impaired information processing. In the auditory domain, it is widely accepted that normal aging is associated with difficulties understanding speech, especially in challenging conditions like in the presence of background noise. In 1988, the Working Group on Speech Understanding and Aging of the Committee on Hearing, Bioacoustics, and Biomechanics concluded that three factors could play a determining role in the presence of these age-related speech comprehension difficulties: 1) cochlear changes, 2) central auditory changes and 3) cognitive changes (National Research Council, 1988).

1) *Cochlear changes.* With normal aging, a bilateral decrease in sensitivity for higher auditory frequencies (4000 Hz and higher) generally occurs, a process known as presbycusis. To this day, the causes of presbycusis are not well understood; contributing factors have however been identified. Physiological degeneration, exposure to noise, medical conditions, as well as absorption of ototoxic drugs were all suggested as possible causes of the condition (Huang & Tang, 2010 for review). In addition to the age-related auditory thresholds shift observed, presbycusis is also associated with a reduction in speech understanding, as well as a decline for the processing of certain high-frequency speech sounds, like sibilant or fricative consonants. It was suggested that the reduction in speech perception was partly caused by presbycusic threshold shifts (Divenyi, Stark & Haupt, 2005). However, others indicate that speech understanding difficulties would occur independently from the reduction in hearing sensitivity (Jerger & Chmiel, 1997).

2) *Central auditory changes.* A reduction in the speed of mental processing can be observed in normal aging (Salthouse, 2000 for review). In the auditory domain, it would alter the way temporal information contained in sounds is processed, especially in noisy environment (Martin & Jerger, 2005 for review). These age-related modifications were first observed via gap detection tasks. Using this kind of paradigm, it was shown that the smallest interval perceived by older adults was greater than the one perceived by younger participants, suggesting a reduced

sensitivity for the processing of the temporal aspects contained in sounds. Interestingly, this reduced capacity is not only present for hearing-impaired older adults but also for older adults with clinically normal hearing (Snell & Frisina, 2000; Schneider, Speranza & Pichora-Fuller, 1998; Snell, 1997; Schneider et al., 1994; Gordon-Salant & Fitzgibbons, 1993). This latter result suggests that the temporal processing difficulties would somewhat be independent of the age-related changes occurring in the peripheral hearing system, and would rather result from the alterations of central auditory processing (Schneider & Hamstra, 1999; Strouse et al., 1998). However, the impact of this age-related reduced temporal processing on speech perception has not been confirmed yet. While, it could hypothetically be assumed it would interfere with speech perception, since being able to effectively discriminate phonetic contrasts is linguistically relevant (Dorman, Lindholm & Hannley, 1985), the matter is still controversial. Indeed, some studies find a relationship between psychoacoustic measures (like gap detection) and speech perception tasks (Gordon-Salant & Fitzgibbons, 1993; Glasberg & Moore, 1989; Irwin & MacAuley, 1987; Dreschler & Plomp, 1985; Tyler et al., 1982), while others do not (Snell & Frisina, 2000; Phillips et al., 2000; Strouse et al., 1998; Van Rooij & Plomp, 1990; Divenyi & Haupt, 1997; Festen & Plomp, 1983).

3) Cognitive changes. The direct contribution of cognitive factors to the age-related decline in speech processing has not been shown yet, and few studies were able to show a direct correlation between cognitive measures and performance at speech processing tasks. In addition, cognitive measures are often highly correlated with peripheral sensitivity changes (Huang & Tang, 2010 for review), making the impact of the two phenomena hard to dissociate. Nonetheless, when task demands are greater, such as in a reverberant environment (Gordon-Salant et al., 1993) and in the presence of interrupting noise (Stuart & Phillips, 1996) or competing speech (Wingfield & Tun, 2007), age-related difficulties are more salient, even when hearing loss are controlled for. In the end, these data suggest that cognitive decline could partly contribute to age-related difficulties in speech comprehension.

All the age-related modifications described above, which interfere with the adequate processing of speech, can have adverse effects on quality of life, and may lead to social isolation and eventually to depression (Howarth & Shone, 2006). It thus appears crucial to be able to

detect speech comprehension difficulties as early as possible, in order to minimize the deleterious effects they may have on the psychological health of older adults.

NORMAL AGING & NONLINGUISTIC PROCESSING

While age-associated processing difficulties for speech and their consequences in everyday life have been documented, the impact of normal aging on the processing of vocal stimuli in general, containing linguistic information or not, still remains uncertain. Indeed, few studies have investigated the effects of age on the perception of non-linguistic information contained in voice. The results of these studies however suggest that normal aging alters the processing of nonlinguistic prosody (Orbelo et al., 2005), affect (Fecteau et al., 2005; Allen & Brosgole, 1993), mood (Brosgole & Weisman, 1995), emotion (among others, Ryan, Murray & Ruffman, 2010, Ruffman, Halberstadt & Murray, 2009) and speaker's age estimation (Linville & Korabic, 1986). Knowing the important place paralinguistic information occupies in allowing adequate and satisfying social interactions, it could be hypothesized that difficulties processing paralinguistic information, like the one contained in speech, may have negative impacts on the quality of life and psychological health of older adults.

In sum, it appears that the processing of vocal information—linguistic or not— is affected by healthy aging. However, to this day, there is no tool allowing the evaluation of the age-related vocal processing difficulties. In the current study, we used a computerized battery evaluating different aspects of vocal perception: the Voice Perception Assessment (VPA), and compared performance level between young and older adults. The VPA consists of four tasks: 1) Gender Source Categorization task, 2) Adaptive Discrimination task, 3) Auditory Source Discrimination task and 4) Voices & Bells Memory task. The latter two tasks also included control tasks with non vocal stimuli, but exactly the same instructions.

Considering the data supporting age's negative effect on speech processing as well as paralinguistic vocal processing, we hypothesized that for all tasks and stimulus types, the performances of older adults would be significantly lower compared to the ones of younger participants.

MATERIAL & METHODS

PARTICIPANTS

Twenty young adults (Y) and sixteen older adults (O) participated to the study (Y: mean age \pm SEM = 24.2 ± 1.1 years, range = 20-39, 10 males; O: mean age \pm SEM = 66.4 ± 1.0 years; range = 60-74, 8 males). The two groups had a comparable number of years of education (mean years \pm SEM: Y: 14.05 ± 0.4 ; O: 14.6 ± 0.5 ; $F_{1,34} = 0.914$, $p = 0.35$). All participants were healthy French native speakers, with no history of neurological or psychiatric episodes. Except for one young and one older adult, every participant was right-handed. They were all recruited through adverts posted at the *Université de Montréal* and in the *Bel Âge* magazine. They all provided written informed consent, which was reviewed and approved by the Scientific and Ethics Committee of the *Centre de Recherche de l'Institut Universitaire de Gériatrie de Montréal (CRIUGM)*. Participants were compensated 30 CAD\$/hour for their participation.

We also made sure that no participant had any substantial musical experience i.e. underwent musical training and/or musical theory for six years or more, since it was suggested that extensive musical training could modify the way general auditory stimuli are processed (Chartrand & Belin, 2006).

TASKS & EXPERIMENTAL DESIGN

Cochlear & primary cortex changes

The hearing sensibility of each participant was tested via an audiometric pure tone screening (0.5 - 8 kHz and a 0-50 dB range; Maico MA 790, Génie Audio). For younger adults, results were considered normal when the thresholds were equal or inferior to 25 dB (HL). Considering the changes occurring in the peripheral auditory system with age (see Huang & Yang, 2010 for review), higher thresholds for higher frequencies (6000 and 8000 Hz) were accepted for older participants, and 30 (HL) thresholds were thus considered normal (Wiley et al., 1998). The binaural average thresholds (BAT) at 500 Hz, 1000 Hz and 2000Hz were purposely considered, since they are the central frequencies for conveying vocal and speech information (French & Steinberg, 1947). They were used as a covariate in the analyses of variance performed. Statistical analyses using a Bonferroni corrected p value ($p = 0.05/3$) comparing the pure tones average of Y and O suggested that O had significant higher PTAT compared to Y for the 500 Hz (mean dB (HL) score \pm SEM: Y: 7.50 ± 1.6 ; O: 13.3 ± 1.9 ; $T_{35} = 2.89$, $p < 0.01$) and 2000 Hz (mean

score \pm SEM: Y: 5.79 ± 1.1 ; O: 18.3 ± 2.91 ; $T_{35} = 1.78$, $p < 0.01$) conditions. There was no group difference for the 1000 Hz condition (mean score \pm SEM: Y: 7.11 ± 1.4 ; O: 10.62 ± 1.67 ; $T_{35} = 4.47$, $p=0.85$).

Central auditory changes in vocal & non vocal stimuli

In order to assess vocal perception in normal aging, a computerized battery was created and named the Voice Perception Assessment (VPA; Vocal Neurocognition Laboratory, <http://vnl.psy.gla.ac.uk/>). Using MCF (Digivox, Montreal), four distinct tasks were created, each task evaluating a different aspect of vocal processing. The overall duration of the battery was approximately 90 minutes. In order to minimize the occurrence of interference for the memory task, we chose to use a fixed task order for all the participants. The order selected was the following: 1) Voices and Bells Memory Task; 2) Adaptive Discrimination Task; 3) Auditory Source Discrimination Task and 4) Gender Categorization Task. Preceding every task, practice trials were done (except for the memorization task, for which practice stimuli could interfere with the experimental stimuli). The entire battery was performed on a PC computer in a soundproof cabin at the International Laboratory for Brain, Music and Sound Research (BRAMS, *Université de Montréal*), and the stimuli were presented through Beyerdynamic DT 770 headphones. For participants with normal hearing (tonal audiometric test; scores ≤ 25 dB (HL) for 1000-3000 Hz range for young adults & scores ≤ 30 dB (HL) for 1000-3000 Hz range for older adults), auditory stimuli were presented at an intensity of 70dB (HL). For those who obtained results higher than or equal to the norm, we adjusted the intensity by increasing it by 5dB (HL) for every 5dB (HL) that was over 25dB (HL) for Y and over 30 dB for O (for example, the intensity would be adjusted to 75dB (HL) for a young adult who obtained a threshold of 30dB (HL) for the 1000-3000 Hz range of the audiometric test).

All the stimuli used in the VPA battery were normalized using the root-mean squared method (RMS). This normalization allowed correcting sounds amplitudes to the average amplitude of the stimuli used for a task, which better reflects the perceived auditory intensity than the peak amplitude.

1) Voice & Bells Memory Task

Stimuli. For the vocal part of the task, 16 vocalizations (8 male and 8 female speakers; duration = 600 ms) of the sustained vowel /a/ were used. For the non vocal control task, 16 bell sounds were selected (duration = 1000 ms). The task is available on the Vocal Neurocognition Laboratory, University of Glasgow website (<http://vnl.psy.gla.ac.uk/>).

Task. Encoding phase: eight different vocalizations were presented, first male voices (4 sounds), then female voices (4 sounds). Each sound was presented three times, with a 1.5-s ISI. Participants were instructed to carefully pay attention to the sounds, with their eyes closed, in order to memorize them. The different target sounds were presented with a 3-s delay.

Recall phase: Following the presentation of the target sounds, an immediate recall was done: 16 stimuli were presented (8 targets & 8 distracters) and participants had to indicate, by pressing a yes or a no button, if the voice heard was previously presented or not (2-alternative forced-choice heard/not heard recognition task). After a 15 minutes delay (during which participants filled the BDI-II short-form or the GDS short-form inventory and a demographic questionnaire), the delayed recall was performed: 16 stimuli were presented (8 targets & 8 new distracters for both types of stimuli) and participants had again to indicate by pressing a button if they heard the stimuli in the encoding phase or not. The encoding and the recall phases were then repeated using the bell sounds. For both stimuli types, the percent correct was used as dependent variable.

2) Adaptive Discrimination Task

Stimuli. Two kinds of vocal stimuli were presented to the participants: natural vocal morphs and vocal morphs that were modified to have the same fundamental frequency (f_0), which was equivalent to the average f_0 of the 64 stimuli used to create the morphing continuum.

Natural vocal morphs: We used recordings of Hillenbrand et al. (1995) to create a male-female voice gender continuum using morphing. An auditory morph can be defined as a sound resulting from the time-frequency juxtaposition of the acoustical characteristics of two natural sounds. The morphs were generated using male and female voice composites (obtained by averaging together vocalizations of 32 male and 32 female speakers, as end-points of the continuum; duration = 350 ms; Bruckert et al., 2010). The syllable used (/hæd/) has no meaning in French, the

maternal language of the recruited participants. We used the Speech Transformation and Representation based on Adaptive Interpolation of weighted spectrogram (STRAIGHT) Matlab toolbox (Kawahara, 2006), and a modified version of the morphing technique described by Kawahara and Matsui (2003). The vocal male and female sounds were decomposed in source and f_0 characteristics, yielding a smooth spectro-temporal representation of the signals. A set of parametric representations derived from this decomposition was then linearly interpolated between the two extremes, and re-synthesized to obtain stimuli morphed between the original male and female stimuli. Here, the 1-128 stimuli represented masculine vocal stimuli while the 873-1000 stimuli represented feminine sounds.

fo-equalized vocal morphs. The morphs obtained by the procedure described previously, were modified in order to have the same f_0 , which was equivalent to the average f_0 of the 32 male and 32 female voices. Again, the 1-128 stimuli represented masculine vocal stimuli while the 873-1000 stimuli represented feminine sounds.

Task. Two pairs of auditory stimuli were presented to the participants. All pairs were either constituted of natural vocal morphs (male and female speakers) or fo-equalized vocal morphs. For each presentation of the two auditory pairs, participants had to decide if the two pairs were identical or not. They gave their answers by pressing an identical or different button (2-alternative forced-choice same/different discrimination task). The task is said to be adaptive because it is based on a psycho-acoustical procedure that allows the stimuli presentation to depend on the level of response accuracy. The design of the task was based on Levitt's transformed up-down procedure (Levitt, 1971) and two consecutive correct answers were necessary to induce a reduction of the physical distance (number of morphing steps) between the sounds of the pairs, while an incorrect answer would increase it. The final percent of correct answers obtained was supposed to approximate 70.7% (Levitt, 1971). Discrimination thresholds were measured as the morphing step difference between two pairs, averaged over the last six reversals (i.e., shift from 'up' to 'down' or vice-versa).

3) Auditory Source Discrimination Task

Stimuli. For this task, vocalizations (Hillenbrand et al., 1995) and musical instrument sounds (Soundfont Internet library; <http://www.hammersound.net/>) were used. First, we

presented to the participants 16 pairs of voices. For each pair, one sound consisted of the vowel /o/ and the other sound was the vowel /a/ (stimuli duration = 600 ms; ISI = 200 ms). From the 16 pairs of sounds, 4 were spoken by adult female speakers, 4 by adult male speakers, 4 by young girls and 4 by young boys. The order of presentation was counterbalanced across pairs. For the task, 8 pairs were constituted by sounds produced by the same speaker, while the other 8 pairs consisted of vocalizations produced by different speakers (same gender and age group). For the second part of the task, the non vocal control test, 16 pairs of musical stimuli were presented (stimuli duration = 600 ms; ISI = 200 ms). They consisted of two musical notes (C and G), played by 15 different musical instruments (banjo, cello, tuba and oboe among others).

For half of the pairs, the two notes were played by the exact same instrument, and for the other half, the notes were played by different instruments that were related (e.g. trombone and tuba, which are both brass instruments).

Task. For the presentation of each pair of sounds, participants had to decide whether the two stimuli came from the same auditory source or not. More precisely, participants had to decide if the two vocal sounds of a pair were produced by the same speaker or not, or if the two musical sounds came from the same instrument or not. Participants indicated their response by pressing a “same” or “different” button (2-alternative forced-choice same/different discrimination task). We used the percent correct to determine the performances.

4) Gender Categorization Task

Stimuli. The same stimuli created for the adaptive discrimination task were used (natural vocal morphs and fo-equalized vocal morphs; duration = 350 ms). The procedure utilized to obtain them is extensively described in the above section. For the task, seven stimuli were drawn from this continuum, corresponding to the 15% steps between the 5% and the 95% ends of the continuum.

Task. The 7 auditory stimuli were presented one by one in a pseudo-random order (one block). The task consisted of ten blocks, for which participants had to decide whether the sound played was either produced by a male or a female speaker. They were instructed to press a button to answer (2-alternative forced-choice male/female categorization task). As a dependent variable, mean categorization values were calculated by fitting subjects' performance with

logistic curves. Through the logistic fits, we obtained the slope value angle of the point of subject equality (PSE), which allows quantifying the strength of the male/female perceptual boundary.

Cognitive changes

Cognitive deficits could also influence the performance on the study tasks, especially in the older adults group. In order to assess for cognitive functioning, every participant, even younger adults, was evaluated for the presence of mild cognitive impairment (MCI) using the Montreal Cognitive Assessment (MoCA, Nasreddine et al., 2003). Subjects tested with the MoCA in the Y group showed normal performances (i.e. total score ≥ 26 ; Nasreddine et al., 2003). In the O group, four subjects obtained scores suggestive of mild cognitive impairment (i.e. total score ≤ 26 ; Nasreddine et al., 2003). Instead of excluding those participants from our analyses, which would have significantly reduced their statistical power, we rather chose to use the MoCA scores as a covariate in the analyses of variance performed. Concordant with the evidence of an age-related cognitive decline (Deary et al., 2009 for review), statistical analyses comparing the MoCA performance of Y and O indicated that the scores of the O group were significantly lower than those of the Y group (mean score \pm SEM: Y: 28.53 ± 0.3 ; O: 26.9 ± 0.4 ; $T_{34} = 3.1$, $p < 0.01$).

Depression having deleterious effects on cognition (McIntyre et al., 2013), every participant was evaluated with a standardized depression inventory as well: the short form of the Beck Depression Inventory-II (Beck & Steer, 1996) for younger adults and the Geriatric Depression Scale-short form (Sheikh & Yesavage, 1986) for older participants.

STATISTICAL ANALYSES

The demographic information and the behavioral data were analyzed using SPSS 19. For all the datasets, the normality of the distributions was first investigated: the distributions were considered normal if their kurtosis and skew values were both comprised between -3 and 3 (Tabachnik & Fidel, 2007). The demographic information (age, years of education & musical training) as well as cognitive performance (MoCA scores) of the young and older adults were compared using independent samples Student's tests. The psychological questionnaire used being different for both groups, no statistical comparison was performed on the scores.

The statistical analyses done on the VPA tasks used the following dependent variables:

- 1) Voices & bells memory task: percent correct; stimulus category (voices; bells) and recall (immediate; delayed) as within-factors;
- 2) Adaptive discrimination task: discrimination thresholds (defined as the mean smallest difference between the morphs pairs over the last 6 reversals); stimulus type (natural; fo-equalized) and speaker's gender (male; female) as within-factors.
- 3) Auditory source discrimination task: percent correct; stimulus category (voices; instruments) as within-factor;
- 4). Gender categorization task: slope value of the PSE; stimulus type (natural; fo-equalized) as within factor.

In order to control for the impact of cognitive functioning and audiometric performance on our results, the two age-groups were compared using repeated-measures ANCOVA (MoCA scores and binaural averages of the tonal audiometric thresholds (dB (HL)) for 500, 1000 and 2000 Hz were used as covariates). The Greenhouse-Geisser estimate was systematically considered since it assumes maximum violation of the assumption of sphericity, and is thus quite conservative. When the analyses were significant, partial eta square were considered as measures of effect sizes. When necessary, Tukey *post-hoc* tests ($p < 0.05$) were used. In those cases, the sizes of our groups being unequal, harmonic *Ns* were calculated and used in the *post-hoc* tests

RESULTS

The demographic characteristics of the Young and Old groups were compared using independent samples Student's tests, and are shown in Table 1. For both groups, the number of years of education and musical training were not statistically distinct. As expected, our two groups differed on the age variable. Importantly, no participant showed scores suggestive of major depression (mean score \pm SEM: **Y**: 3.95 ± 1.16 ; **O**: 1.75 ± 0.57 ; clinical cutoffs for mild depression: BD-II short-form ≥ 4 & GDS short-form ≥ 6).

Cochlear & primary cortex changes

Audiometric results using pure tone averages (Bonferroni correction $p = 0.05/3$) showed higher BAT in Old than Young participants for the 500 Hz (mean dB (HL) score \pm SEM: Y: 7.50 ± 1.6 ; O: 13.3 ± 1.9 ; $T_{35} = 2.89$, $p < 0.01$) and 2000 Hz (mean score \pm SEM: Y: 5.79 ± 1.1 ; O: 18.3 ± 2.91 ; $T_{35} = 1.78$, $p < 0.01$) conditions. There was no group difference for the 1000 Hz condition (mean score \pm SEM: Y: 7.11 ± 1.4 ; O: 10.62 ± 1.67 ; $T_{35} = 4.47$, $p = 0.85$).

Cognitive changes

Concordant with the evidence of an age-related cognitive decline (Deary et al., 2009 for review), statistical analyses comparing the MoCA performance of Y and O indicated that the scores of the O group were significantly lower than those of the Y group (mean score \pm SEM: Y: 28.53 ± 0.3 ; O: 26.9 ± 0.4 ; $T_{34} = 3.1$, $p < 0.01$).

~ Insert Table 1 About Here ~

Central auditory changes in vocal & non vocal stimuli

We chose to use analysis of covariance (ANCOVA) to explore whether differences in vocal perceptual processing exist between young and older adults while controlling for differences in general cognitive functioning (MoCA scores) and audiometric performance (thresholds at 500 Hz, 1000 Hz and 2000 Hz). The results of Y and O on the four VPA tasks are summarized in Table 2.

~ Insert Table 2 About Here ~

Voices & Bells Memory Task

The ANCOVA for Y and O on the percent correct while controlling for cognitive functioning and auditory acuity showed a significant main effect of age: Y showed better performance scores than O ($F_{(1,27)} = 9.57$, $p < 0.01$, partial eta squares = 0.26). The age x stimulus category interaction almost reached significance ($F_{(1,27)} = 3.38$, $p = 0.08$; partial eta squared = 0.11), and O had a tendency to perform better for the memorization of bells compared to voices, while Y performed similarly to both stimulus types (Fig. 1). However, the recall x stimulus type

interaction reached significance ($F_{(1,27)} = 4.31$, $p < 0.05$; partial eta squared = 0.14). Tukey post hoc analyses ($p < 0.05$) indicated that for the delayed recall, percent correct for both stimulus types were similar, while for the immediate recall, the recognition of bell sounds was significantly greater than the recognition of vocal sounds (Fig 1).

~ Insert Figure 1 About Here ~

The stimulus type x thresholds at 2000 Hz was significant as well ($F_{(1,28)} = 11.7$, $p < 0.01$, partial eta squares = 0.30). In order to assess these results, we created two groups, separating the participants according to the audiometric thresholds average at 2000 Hz: one with audiometric performance below the group average (L; $n = 21$; 17 Y; mean audiometric threshold \pm SEM: 5.0 ± 0.54) and one with audiometric performance above the group average (S; $n = 13$; 3 Y; mean audiometric threshold \pm SEM: 22.5 ± 2.61). A Tukey post-hoc test at $p < 0.05$ indicated that the percent correct for L were similar for voices and bells, while for S, results were higher for bells than vocal stimuli (Fig. 1).

Adaptive Discrimination Task

While controlling for cognitive functioning and audiometric performance, the age x stimulus type interaction was significant ($F_{(1,27)} = 6.23$, $p < 0.05$, partial eta squares = 0.188). A Tukey post-hoc test at $p < 0.05$ indicated that Y and O performed similarly for the discrimination of fo-equalized pairs, while Y had significantly smaller discrimination thresholds than O for the discrimination of natural vocal morph pairs (Fig. 2).

~ Insert Figure 2 About Here ~

The stimulus type x thresholds at 500 Hz and 2000 Hz interactions were also significant (**500 Hz:** $F_{(1,27)} = 6.58$, $p < 0.05$, partial eta squares = 0.196; **2000 Hz:** $F_{(1,27)} = 4.45$, $p < 0.05$, partial eta squares = 0.142). We created two groups, separating the participants according to the audiometric thresholds averages at 500 Hz and 2000 Hz (mean binaural audiometric threshold (dB (HL)) \pm SEM: **500 Hz:** 10.14 ± 1.14 ; **2000 Hz:** 11.50 ± 1.76). For each audiometric frequencies, two groups were obtained: one with audiometric thresholds lower than the group average (L;

500 Hz: $n = 18$; 8 Y; mean audiometric threshold \pm SEM: 500 Hz 4.86 ± 0.58 ; **2000 Hz:** $n = 22$; 17 Y; mean audiometric threshold \pm SEM: 6.67 ± 1.4) and one with audiometric thresholds superior to the group average (S: **500 Hz:** S; $n = 18$; Y = 10; mean audiometric threshold Hz \pm SEM: 12.1 ± 1.2 ; **2000 Hz:** $n = 14$; 3 Y; mean audiometric threshold Hz \pm SEM: 13.7 ± 2.1). Tukey *post-hoc* tests at $p < 0.05$ indicated that for both audiometric conditions, the discrimination thresholds in the L group were similar for natural and fo-equalized vocal morphs, while in the S group, discrimination thresholds were better regarding natural sounds compared to fo-equalized sounds (Fig. 2).

Auditory Source Discrimination Task

The ANCOVA for Y and O on the percent correct while controlling for cognitive and auditory functioning showed a significant main effect of age (Fig. 3): Y showed better performance scores than O ($F_{(1,28)} = 7.24$, $p < 0.05$, partial eta squares = 0.21). However, the type of stimuli did not influence the performance ($F_{(1,28)} = 0.106$, $p = 0.75$). The age \times stimulus type was not significant either ($F_{(1,28)} = 0.177$, $p = 0.677$). None of the covariates were significant.

~ Insert Figure 3 About Here ~

Gender Source Categorization Task

The ANCOVA for Y and O while controlling for cognitive functioning and auditory acuity was found to have no statistical significant main effects (**Age:** $F_{(1,28)} = 0.82$, $p = 0.37$; **Stimulus Type:** $F_{(1,28)} = 0.90$, $p = 0.35$). The age \times stimulus type interaction was also non significant ($F_{(1,28)} = 0.42$, $p = 0.84$), as well as the main effects of all the covariates (**MoCA scores:** $F_{(1,28)} = 0.93$, $p = 0.34$; **BAT-500 Hz:** $F_{(1,28)} = 0.22$, $p = 0.64$; **BAT-1000 Hz:** $F_{(1,28)} = 0.93$, $p = 0.34$; **BAT-2000 Hz:** $F_{(1,28)} = 0.25$, $p = 0.88$), and their interactions with stimulus types and age. These results indicate that young and older adults performed similarly on the task, independently of their differences in audition and general cognitive abilities (Fig.4).

---Insert Figure 4 About Here---

DISCUSSION

The purpose of this study was to compare, using a computerized battery, the performance of young and older adults during the processing of paralinguistic vocal information. Four computerized tasks were elaborated in order to evaluate different aspects of paralinguistic vocal processing. This study suggests that normal aging can affect vocal perception. In addition, these age-related differences in performance were not systematically mediated by the normal age-related cognitive or auditory decline. This study strongly suggests that normal aging is associated with a general alteration of vocal information processing, even when the stimuli are free of linguistic or emotional content.

AGE-RELATED AUDITORY VOCAL PROCESSING DIFFICULTIES

We hypothesized that for all the VPA tasks and for all stimuli types, older adults would perform less efficiently than young adults. We observed such a pattern for the vocal adaptive discrimination task, the auditory source discrimination task and the voices and bells memory task. These results confirm the existing data suggesting that normal aging is associated with a reduced efficiency to process auditory information, may it be vocal or not (among others, Pichorra-Fuller & Souza, 2004; Orbelo et al., 2005; Huang & Tang, 2010).

However, younger and older adults performed similarly to the gender source categorization task. For this task, participants had to determine if a given vocal morph was produced by a male or a female speaker, and stimuli were either natural or modified to have an equivalent fo. There is not much data concerning the impact of aging on gender categorization tasks. However, some studies compared the performance of younger and older adults at an age estimation task using vowels as stimuli (Linville & Korabic, 1986). To perform on the task, older adults used a wider range of acoustic information compared to young adults, but both groups nevertheless tended to categorize the stimuli similarly. Here, older adults might have used different strategies than younger adults to perform the task, even though both groups obtained similar results.

CONTRIBUTION OF GENERAL COGNITIVE & AUDITORY FUNCTIONNING

In order to control for the contribution of general cognitive functioning and auditory acuity, MoCA scores and tonal audiometric thresholds at 500 Hz, 1000 Hz and 2000 Hz were

added as covariates to our statistical analyses. While the main effects of age remained significant for three out of four tasks of the VPA, our analyses suggested that some of the covariates may as well account for a portion of the observed variance.

Contribution of cognitive functioning

For all the VPA tasks, neither the main effects of the MoCA scores nor its interactions with the independent variables were significant. This suggests that general cognitive abilities, as elicited by the screening test used, could not predict the performances at the four VPA tasks.

Previous studies assessing the contribution of cognitive deficits in the age-related difficulties processing affective prosody used measures estimating the functioning of various cognitive domains (among other, *so-called crystallized and fluid* intelligence, attention, memory or executive control). Some authors found no relationship between performance on neuropsychological tests and affective prosody processing (Orbelo et al., 2005; Mitchell, 2007; Ryan, Murray & Ruffman, 2010; Mitchell & Kingston, 2011). However, for one study, the level of *so-called-fluid* intelligence could account for the recognition of affective prosody, but essentially for participants who performed poorly on the paralinguistic tasks (Ruffman, Halberstadt & Murray, 2009). The absence of relationship between the VPA performances and the MoCA scores is important since it suggests that, as it seems to be the case for the processing of emotional prosody, the difficulties in processing of non emotional paralinguistic information observed in older adults are primary in origin, and not the artefact of an age-related cognitive decline.

Contribution of auditory functioning

On the other hand, the auditory acuity seems to contribute to the observed age-related differences to some of the VPA tasks. For the adaptive discrimination task and the voices and bells memory task, the performance was affected by the audiometric thresholds. For both tasks, the patterns were similar: participants with good auditory acuity (i.e. with thresholds inferior to the group average) performed similarly on the two stimulus conditions of the tasks, while participants with poorer auditory acuity were better at the discrimination of natural stimuli compared to fo-equalized sounds (adaptive discrimination task), and at the memorization of bells as opposed to voices (voices and bells memory task).

It is the first time this question was addressed for non emotional paralinguistic information, and our results are not in agreement with the previous works that investigated the contribution of presbycusis in the processing of vocal emotions (Orbelo et al., 2005; Mitchell & Kingston, 2011). Contrary to what is observed for affective prosody, it appears that a reduced auditory acuity for higher frequencies (2000 Hz) but also lower ones (500 Hz) could account for a portion of the difference observed between our two age-groups. Our results suggest that auditory difficulties have a greater impact on the processing of non affective vocal prosody than on the processing of affective prosody. One possible explanation for this differential effect of hearing loss could be that in order to efficiently process non emotional vocal stimuli, participants had to perceive and process more subtle acoustic variations, which would become hardly feasible when the auditory acuity is reduced. It however seems relevant to mention that the previous results probably do not translate an isolated effect of auditory loss. The L and S groups containing both Y and O participants, although distributed differently (adaptive discrimination task: **500 Hz**: L: 8 Y & 10 O; S: 10 Y & 8 O; **2000 Hz**: n = 22; 17 Y & 5 O; voices & bells memory task: **2000 Hz**: L: 17 Y & 4O; S: 3 Y & 9 O), a mixed contribution of both aging and loss of auditory acuity seems to account for the interactions.

STIMULI NATURE & AGE-RELATED DIFFERENCES

Vocal vs. Non Vocal sounds

Two tasks of the VPA compared the processing of vocal and non vocal information: the auditory source categorization task and the voices & bells memory task. As it was expected, the performance of older adults was inferior to the one of young adults for both tasks. For the memory task, we observed distinct processing patterns for vocal and non vocal sounds: while for younger adults, performance on both stimuli types were not statistically different, older adults tended to perform better at memorizing bell sounds compared to vocal sounds. However, for the auditory source discrimination task and for both groups, the percent correct was not statistically different regarding to the discrimination of vocal sounds or the processing of musical stimuli.

The difference between the two patterns of results could be linked to the fact that the latter task (auditory source discrimination task) is a low-level perceptual task while the first (voices & bells memory task) is a higher-level cognitive task. In that sense, the discrimination task

would then be less cognitively demanding than the memorization task. This result suggests that age-related differences for the processing of non affective prosody would be more salient when the difficulty level is greater. Similar results were observed in previous studies (Wingfield & Tun, 2001; Stuart & Phillips, 1996; Gordon-Salent et al., 1993)

Natural vs. fo-equalised sounds

On the gender source categorization task, performance was similar for natural and same pitch sounds. On the vocal adaptive discrimination task, both age groups performed similarly for fo-equalised morph pairs while a significant group difference was observed for the discrimination of natural vocal morphs: young adults performed better than older adults.

The experimental paradigm selected for our gender categorization task is very similar to the one used by Pernet and Belin (2012) for a study in which they assessed, using vocal morphs (among others, natural and fo-E), the role of pitch and timber in gender categorization. As it is observed here, the categorization performance of healthy young adults was comparable concerning the natural vocal and fo-E morph pairs. Authors concluded that gender categorization would mainly rely on timber processing. Here, since both groups performed similarly, the data obtained for older adults could be interpreted the same way.

A significant group difference was obtained on the vocal adaptive discrimination task, only for natural vocal morph pairs (and not for fo-E ones). This result seems to indicate that equalizing the fo of certain stimuli, and thus, standardizing a portion of their acoustical structure, facilitated their discrimination. In the end, it appears that the use of fo-E stimuli have lessened the task sensitivity to age-related differences.

CONCLUSION

In summary, our data provide several novel findings. They suggest that while controlling for general cognitive functioning and auditory acuity, normal aging affects negatively the processing of vocal information, even when the emphasis is not put on linguistic processing. A portion of these difficulties could be accounted for by the presence of auditory decline. They also indicate that the age-related difficulties are more salient when the cognitive demands are high. These data are consistent with the idea that worsening performance in the processing of

vocal information, linguistic or not, might be encountered by most of older adults, and that they are not an artefact of age-related cognitive decline.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by CIHR doctoral award to Guylaine Bélizaire. We would like to thank the *Unité de Neuroimagerie Fonctionnelle* of the *Centre de Recherche de l'Institut Universitaire de Gériatrie de Montréal*.

DISCLOSURE STATEMENT

The authors disclose no conflicts of interest. The Institutional Review Board at each site approved the study methods, and all participants gave written informed consent.

REFERENCES

- Allen, R., & Brosgole, L.** (1993). Facial and auditory affect recognition in senile geriatrics, the normal elderly and young adults. *International Journal of Neuroscience*, 68, 33-42.
- Beck, A. T., & Steer, R.A.** (1996). *Beck depression inventory manual*. San Antonio, TX: Psychological Corporation.
- Brosgole, L. & Weisman, J.** (1995). Mood recognition across the ages. *International Journal Neuroscience*, 82(3-4), 169-89.
- Bruckert, L., Bestelmeyer, P., Latinus, M., Rouger, J., Charest, I., Rousselet, G.A., Kawahara, H., Belin, P.** (2010). Vocal attractiveness increases by averaging. *Current Biology*, 20(2), 116-120.
- Chartrand, J.P. & Belin, P.** (2006). Superior voice timbre processing in musicians. *Neuroscience Letters*, 405(3), 164-167.
- Divenyi, P.L. & Haupt, K.M.** (1997). Audiological correlates of speech understanding deficits in elderly listeners with mild-to-moderate hearing loss. III. Factor representation. *Ear and Hearing*, 18(3), 189-201.
- Divenyi, P.L., Stark, P.B. & Haupt, K.M.** (2005). Decline of speech understanding and auditory thresholds in the elderly. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 118(2):1089-100.
- Dorman, M.F., Lindholm, J.M. & Hannley, M.T.** (1985). Influence of the first formant on the recognition of voiced stop consonants by hearing-impaired listeners. *Journal of Speech and Hearing Research*, 28(3), 377-80.
- Dreschler, W.A. & Plomp, R.** (1985). Relations between psychophysical data and speech perception for hearing-impaired subjects. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 78(4), 1261-70.

- Fecteau, S., Armony, J.L., Joannette, Y. & Belin, P.** (2005). Judgment of emotional nonlinguistic vocalizations: age-related differences. *Applied Neuropsychology*, 12(1), 40-8.
- Festen, J.M. & Plomp, R.** (1983). Relations between auditory functions in impaired hearing. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 73(2), 652-62.
- Glasberg, B.R. & Moore, B.C.** (1989). Psychoacoustic abilities of subjects with unilateral and bilateral cochlear hearing impairments and their relationship to the ability to understand speech. *Scandinavian Audiology. Supplementum*, 32, 1-25.
- Gordon-Salant, S. & Fitzgibbons, P.J.** (1993). Temporal factors and speech recognition performance in young and elderly listeners. *Journal of Speech and Hearing Research*, 36(6), 1276-85.
- Howarth, A. & Shone, G.R.** (2006). Ageing and the auditory system. *Postgraduate Medical Journal*, 82(965), 166-71.
- Huang, Q. & Tang, J.** (2010). Age-related hearing loss or presbycusis. *European Archives of Otorhinolaryngology*, 267(8), 1179-91.
- Irwin, R.J. & McAuley, S.F.** (1987). Relations among temporal acuity, hearing loss, and the perception of speech distorted by noise and reverberation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 81(5), 1557-65.
- Jerger, J. & Chmiel, R.** (1997). Factor analytic structure of auditory impairment in elderly persons. *Journal of the American Academy of Audiology*, 8(4), 269-76.
- Levitt, H.** (1971). Transformed up-down methods in psychoacoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 49(2), 467-477.

- Linville, S.E. & Korabic, E.W.** (1986). Elderly listeners' estimates of vocal age in adult females. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 80(2), 692-694.
- Martin, J.S. & Jerger, J.F.** (2005). Some effects of aging on central auditory processing. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 42(4 Suppl 2), 25-44.
- National Research Council** (1988). Speech understanding and aging. Working Group on Speech Understanding and Aging. Committee on Hearing, Bioacoustics, and Biomechanics, Commission on Behavioral and Social Sciences and Education. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 83(3), 859-95.
- Orbelo, D.M., Grim, M.A., Talbott, R.E. & Ross E.D.** (2005). Impaired comprehension of affective prosody in elderly subjects is not predicted by age-related hearing loss or age-related cognitive decline. *Journal of Geriatric Psychiatry and Neurology*, 18(1), 25-32.
- Pernet, C.R. & Belin, P.** (2012). The role of pitch and timbre in voice gender categorization. *Frontiers in Psychology*, 3, 23.
- Phillips, S.L., Gordon-Salant, S., Fitzgibbons, P.J. & Yeni-Komshian, G.** (2000). Frequency and temporal resolution in elderly listeners with good and poor word recognition. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, 43(1), 217-28.
- Pichorra-Fuller, M.K. & Souza, P.E.** (2004). Effectis of aging on auditoru processing of speech. *International Journal of Audiology*, 42(6),11-16
- Ryan, M., Murray J. & Ruffman, T.** (2010). Aging and the perception of emotion: processing vocal expressions alone and with faces. *Experimental Aging Research*, 36(1), 1-22.
- Ruffman, T., Halberstadt, J. & Murray, J.** (2009). Recognition of facial, auditory, and bodily emotions in older adults. *The Journals of Gerontology Serie B, Psychological Sciences and Social Sciences*, 64(6), 696-703.

- Salthouse, T.A.** (2000). Aging and measures of processing speed. *Biological Psychology*, 54(1-3), 35-54.
- Schneider, B.A., Pichora-Fuller, M.K., Kowalchuk, D. & Lamb, M.** (1994). Gap detection and the precedence effect in young and old adults. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 95(2), 980-91.
- Schneider, B., Speranza, F. & Pichora-Fuller, M.K.** (1998). Age-related changes in temporal resolution: envelope and intensity effects. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 52(4), 184-91.
- Schneider, B.A. & Hamstra, S.J.** (1999). Gap detection thresholds as a function of tonal duration for younger and older listeners. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 106(1), 371-80.
- Snell, K.B.** (1997). Age-related changes in temporal gap detection. *J Acoust Soc Am.* 101(4), 2214-20.
- Snell, K.B. & Frisina, D.R.** (2000). Relationships among age-related differences in gap detection and word recognition. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 107 (3), 1615-26.
- Strouse, A., Ashmead, D.H., Ohde, R.N. & Grantham, D.W.** (1998). Temporal processing in the aging auditory system. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 104(4), 2385-99.
- Stuart, A. & Phillips, D.P.** (1996). Word recognition in continuous and interrupted broadband noise by young normal-hearing, older normal-hearing, and presbycusis listeners. *Ear and Hearing*, 17(6), 478-89.
- Tabachnick, B.G. & Fidell, L.S.** (2007). *Using multivariate statistics*. Ed. Boston Pearson.

Tyler, R.S., Summerfield, Q., Wood, E.J. & Fernandes, M.A. (1982). Psychoacoustic and phonetic temporal processing in normal and hearing-impaired listeners. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 72(3), 740-52.

van Rooij, J.C. & Plomp, R. (1990). Auditive and cognitive factors in speech perception by elderly listeners. *Acta Oto-Laryngologica. Supplementum*, 476, 177-81.

Wingfield, A. & Tun, P.A. (2007). Cognitive supports and cognitive constraints on comprehension of spoken language. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 18(7), 548-58

Table 1. Young and older adults' demographic, cognitive and psychological characteristics

Abbreviations: *M* = mean values; *sem* = standard error mean; MoCA = Montreal Cognitive Assessment; BDI-II SF = Beck Depression Inventory-II Short Form; GDS-SF = Geriatric Depression Scale-Short Form.

	Young Adults N = 20 <i>M (sem)</i>	Older Adults N = 16 <i>M (sem)</i>	<i>t</i> ₃₅	<i>p</i>
Age	24.2 (1.1)	66.4 (1.0)	26.9	< 0.01
Education (years)	14.0 (0.36)	14,6 (0.47)	1.10	0.29
MoCA	28.5 (0.29)	26.9 (0.4)	3.13	< 0.01
BDI-II	3,95 (1,2)			
GDS-SF		1.75 (0.57)		
Musical training (years)	1.05 (1.64)	1.5 (2.24)	0.73	0.47
Hearing sensitivity (500 Hz)	7,5 (1,64)	13,3 (1,86)	2.89	< 0.01
Hearing sensitivity (1000 Hz)	7,1 (1,42)	10,6 (1,67)	1.78	0.08
Hearing sensitivity (2000 Hz)	5,79 (1,05)	18,3 (2,91)	4.47	<0.001

Table 2. Young and older adults' performances on the four VPA tasks

Abbreviations: *M* = mean values; *sem* = standard error mean; *DV* = dependent variable; *IR* = immediate recall; *DR* = delayed recall

	Young Adults	Older Adults
	N = 20	N = 16
	<i>M (sem)</i>	<i>M (sem)</i>
Gender Source Categorization Task (<i>DV = slope values of PSE</i>)		
natural sounds	0.802 (0,11)	0.663 (0.13)
same pitch sounds	0,591 (0.08)	0.635 (0,10)
Vocal Adaptive Discrimination Task (<i>DV = discrimination thresholds</i>)		
natural sounds		
male speakers	45.06 (7.25)	85.02 (8.14)
female speakers	28,4116 (5.26)	58.25 (8.06)
same pitch sounds		
male speakers	36,11 (4.41)	50.51 (4.30)
female speakers	33,33 (4.22)	45.84 (1.27)
Auditory Source Discrimination Task (<i>DV = percents correct</i>)		
voices	72.03 (1.78)	67.71 (1.27)
musical instruments	75.00 (2.09)	66.044 (2.66)
Voices & Bells Memory Task (<i>DV = percents correct</i>)		
voices		
IR	77,81 (2.20)	63.84 (2.87)
DR	73,44 (2.97)	61.61 (2.61)
bells		
IR	85.00 (2.50)	82.14 (2.91)
DR	72,81 (1.59)	67.41 (2.03)

Figure 1: Voices & Bells Memory Task

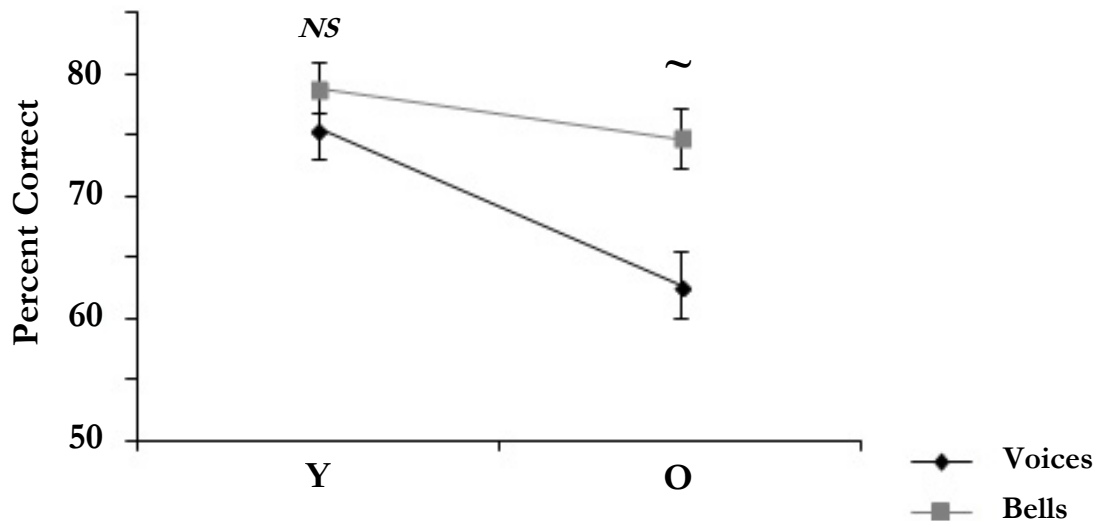
The age x stimulus type interaction almost reached significance. O tended to perform better memorizing bells than voices, while Y performed similarly to both stimulus types.

The recall x stimulus type interaction was significant. Tukey *post hoc* analyses ($p < 0.05$) indicated that both groups performed similarly for both stimulus types for the DR, while the recognition of bells was significantly greater than the one for voices for the IR.

The binaural auditory thresholds (2000 Hz) x stimulus type interaction also reached significance. To assess it, we separated participants' performance according to their audiometric thresholds at 2000 Hz being lower or greater to the group's average. Tukey *post hoc* analyses ($p < 0.05$) indicated that the participants with good auditory acuity performed similarly for the memorization of voices or bells sounds. Participants with poorer auditory acuity were better at the memorization of bells than voices.

Abbreviations: Y = Young adults; O = Older adults; IR = Immediate Recall; DR = Delayed Recall; S = participants with audiometric thresholds superior to the group average

* : $p < 0.05$; ~ : $p = 0.08$; NS: $p > 0.05$



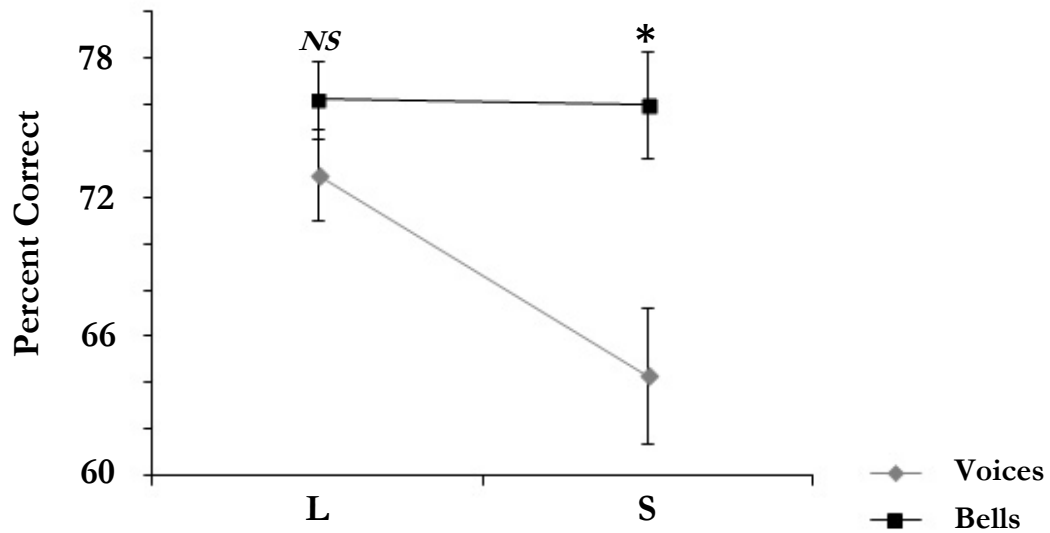
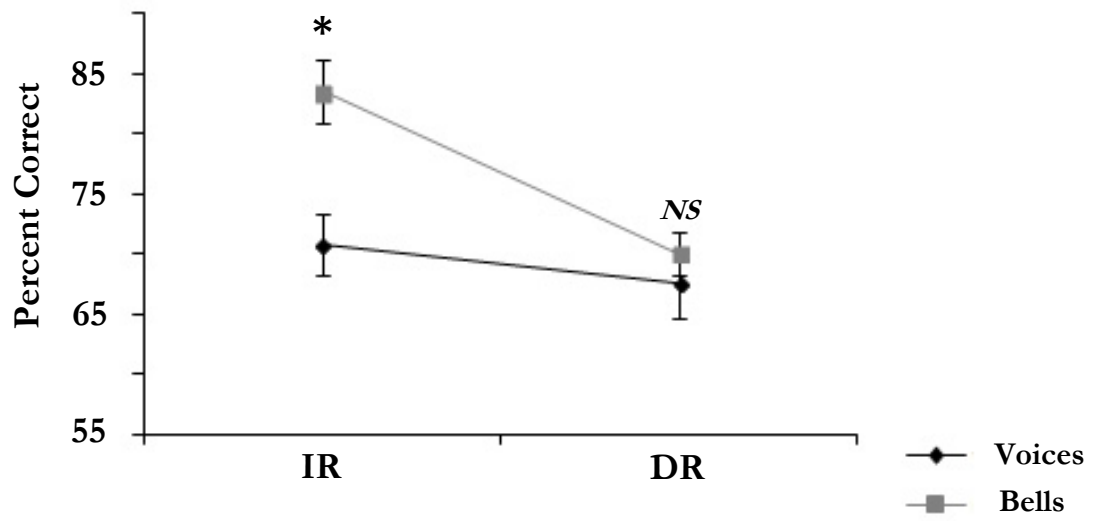


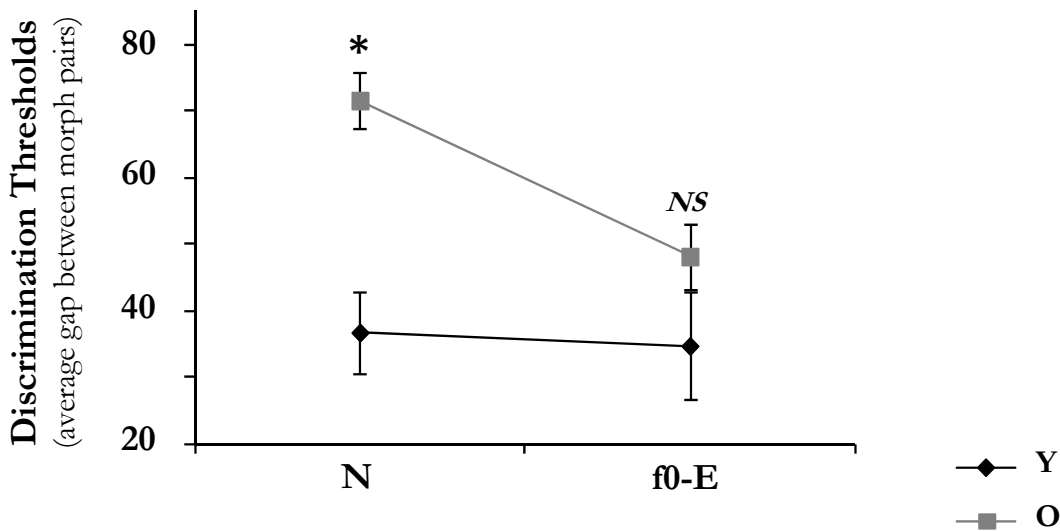
Figure 2. Vocal Adaptive Discrimination Task

The age x stimulus type interaction was significant, suggesting that when controlling for general cognitive and auditory functioning, Y and O performed similarly regarding the discrimination of fo-equalized pairs, while Y had significantly smaller discrimination thresholds than O for the natural vocal morph pairs.

The binaural audiometric thresholds at 500 and 2000 Hz x stimulus type interactions were significant as well. To assess it, we separated participants' performance to the task according to their audiometric thresholds at 500 Hz and 2000 Hz being lower or greater to the group's average. For both frequencies, the participants with good auditory acuity performed similarly for the discrimination of N or fo-equalised pairs. Participants with poorer auditory acuity were better at the discrimination of fo-equalised than N pairs.

Abbreviations: Y = Young adults; O = Older adults; N = natural vocal morph pairs; fo-E = fo-equalized vocal morph pairs; L = participants with audiometric thresholds lower to the group average; S = participants with audiometric thresholds superior to the group average

* $p < 0.05$; NS : $p > 0.05$



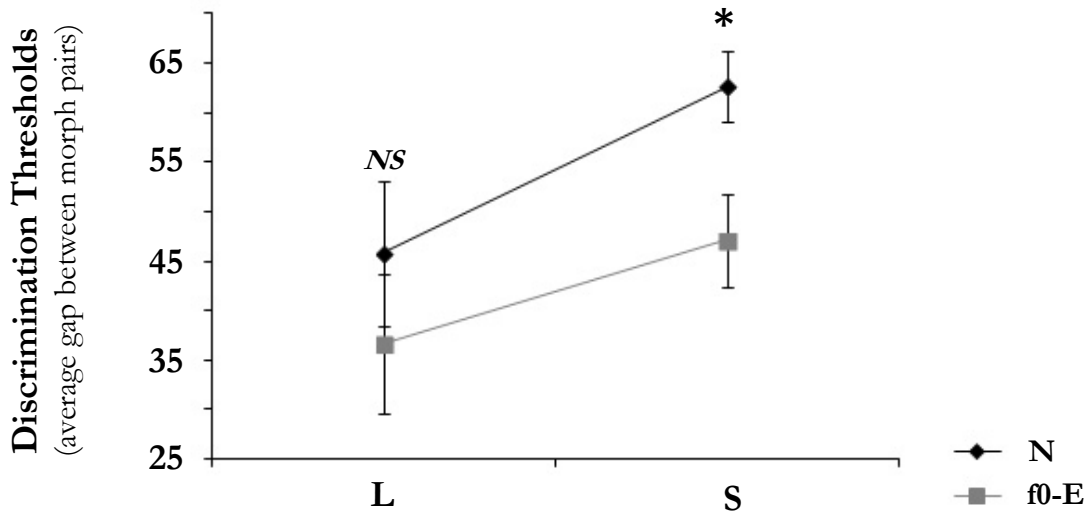
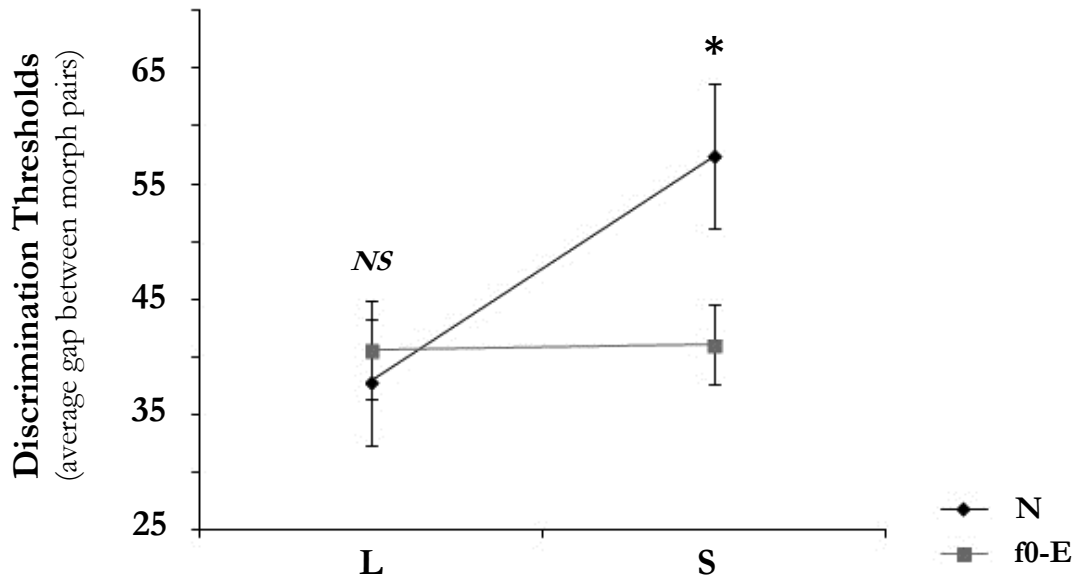


Figure 3: Auditory Source Discrimination Task

While controlling for general cognitive functioning and auditory acuity, the percent correct of Y were significantly greater than the ones of O, independently of the stimulus types.

Abbreviations: Y = Young adults; O = Older adults

* : $p < 0.05$; NS: $p > 0.05$

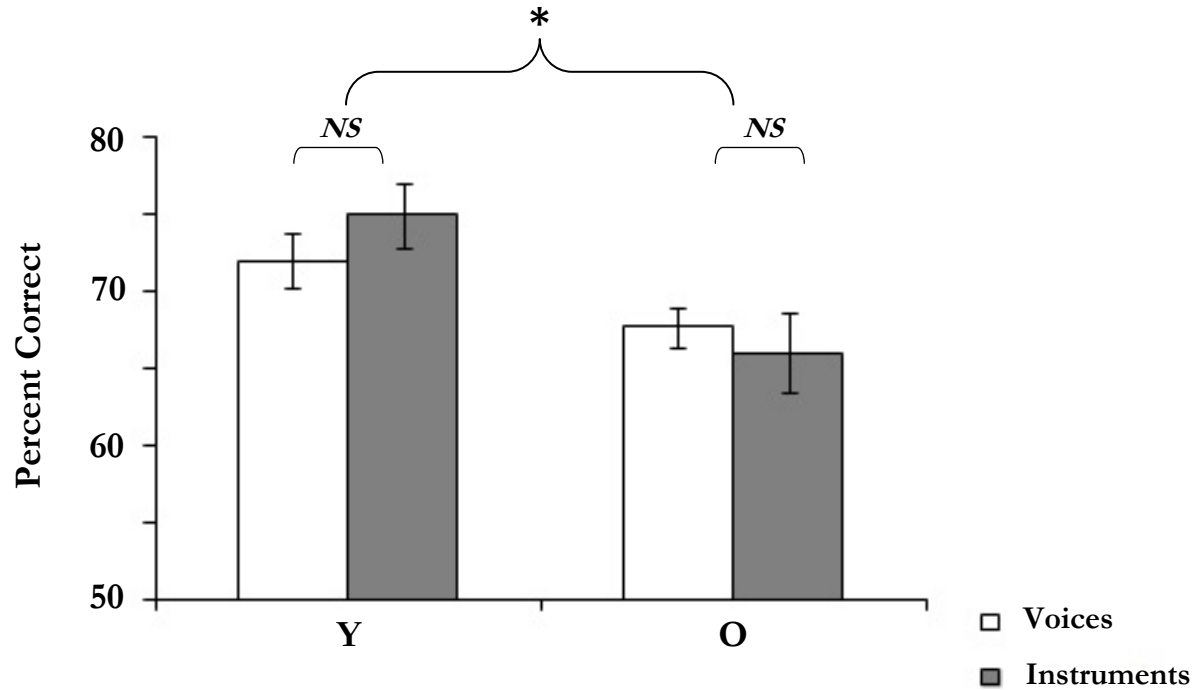
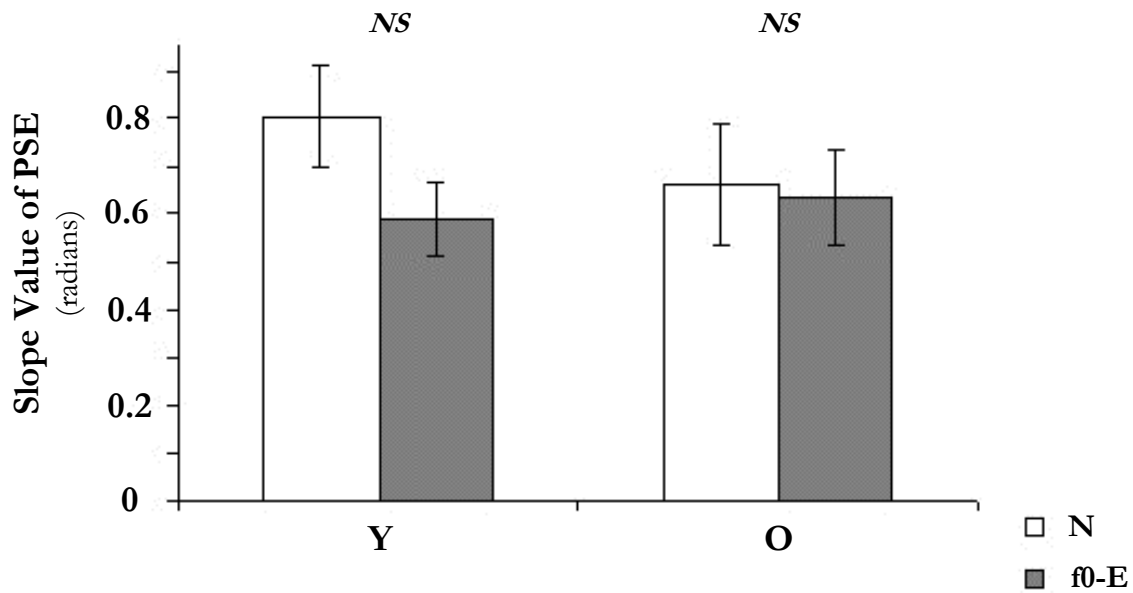


Figure 4. Gender Source Categorization Task

When controlling for general cognitive functioning and auditory acuity, the performance, elicited by the slope value of the PSE (in radians), is comparable for Y and O adults. Similar patterns are obtained for N or SP auditory stimuli.

Abbreviations: Y = Young adults; O = Older adults; PSE = Point of Subject Equality; N = natural vocal morph pairs; f0-E = f0-equalized vocal morph pairs

NS : $p > 0.05$



ARTICLE 2

CEREBRAL VOICE PROCESSING & AGING:

A VOCAL CASE OF NEUROPLASTICITY

Guyline Bélizaire ^{a,b}, Yves Joanette ^b, Jean-Pierre Chartrand ^a, Fanny-Maude Urfer ^a

Cyril Pernet ^c & Pascal Belin ^{a,d,e}

^a International Laboratory for Brain, Music and Sound (BRAMS), Université de Montréal, Montréal, Canada.

^b Centre de Recherche de l'Institut Universitaire de Gériatrie de Montréal, and Faculty of Medicine, Université de Montréal, Montréal, Canada.

^c Brain Imaging Research Centre, Neuroimaging Sciences, University of Edinburgh, Edinburgh, United Kingdom

^d Institute of Neuroscience and Psychology, University of Glasgow, Glasgow, United Kingdom

^e Institut des Neurosciences de La Timone, UMR 7289, CNRS & Université Aix-Marseilles

Soumis au Journal of Gerontology, Psychological Sciences

SUMMARY

Cerebral reorganization accompanying normal aging was characterized for speech perception, but the effects of age on the cerebral processing of paralinguistic vocal information remain unclear. We used functional magnetic resonance imaging (fMRI) in young and older participants to examine possible age-associated neurofunctional cerebral reorganization of voice processing. To localize temporal voice areas (TVA), participants underwent a fMRI scan contrasting vocal and non vocal stimuli. They then performed an adaptive voice discrimination task at comparable levels of performance. During the voice area localization task, older participants recruited additional areas in temporal, frontal and parietal cortices, and showed reduced activation of the left transverse temporal gyrus (ITTG). During voice discrimination, older adults showed greater activation in temporal and prefrontal areas despite performing similarly to young participants. Normal aging appears to be associated with a modification of the cerebral networks underlying paralinguistic voice processing, suggestive of the instalment of mechanisms of neural compensation.

Keywords: voice processing, paralinguistic information, older adults, cerebral plasticity, neural compensation, fMRI

INTRODUCTION

Older participants are generally less efficient at speech perception tasks, particularly when listening conditions are challenging (see Pichora-Fuller & Souza, 2003 for review). This age-associated performance decrease cannot simply be explained by a peripheral loss of sensitivity or by presbycusis. Since young and older adults performed comparably at using supportive contextual information, it was suggested that normal age-related cognitive decline could not fully explain those difficulties either (Frisina & Frisina, 1997). To account for this age-related reduction in speech processing, Frisina and Frisina (1997) suggested the participation of a neural reorganization involving the brainstem and/or the auditory cortex.

In the paralinguistic domain, analogous age-related difficulties are observed, and aging seems to affect how non linguistic prosody (Orbelo et al., 2005), affect (Fecteau et al., 2005; Allen & Brosigole, 1993), mood (Brosigole & Weisman, 1995) and speaker's age (Linville & Korabic, 1986) are perceived. Thus, the processing of vocal information in general—linguistic or not—appears to be affected by normal aging.

In the young adult brain, a network of cerebral regions involved in the processing of vocal information has been identified (Belin et al., 2000, von Kriegstein and Giraud, 2004; Belin et al., 2004; von Kriegstein et al., 2005; Belin, 2006; Warren et al., 2006 and for review, Paterson & Johnsrude, 2008). Bilateral cortical regions located along the anterior/middle part of the superior temporal gyrus (STG) and sulcus (STS), termed the temporal voice areas (TVA), show a selective response to vocal compared to non vocal stimuli. This greater response to vocal sounds is observed even when vocalizations do not specifically contain speech, suggesting that the TVA are not exclusively involved in the processing of linguistic information (Belin, Zatorre & Ahad, 2002; Grandjean et al., 2005; Ethofer et al., 2007).

However, how the TVA and the cerebral processing of paralinguistic information in voices are affected by normal aging is presently unclear. In the current study we tested whether normal aging induces a reorganization of the cerebral processing of vocal information. Young and older healthy adult volunteers were scanned using functional magnetic resonance imaging (fMRI): (i) during a passive listening task contrasting vocal and non vocal sounds ('voice area localizer'); (ii) during a voice discrimination task using an adaptive staircase procedure measuring

brain activity at two different levels of performance, comparable across groups. The voice discrimination task was performed at two different performance levels since it has been suggested that age-related patterns of neuronal reorganization could vary in function of the task demands (Cabeza et al., 2002; Reuter-Lorenz & Cappell, 2008).

METHODS

Participants

Functional voice area localizer. Sixteen healthy young adults (**Y**; mean age \pm SEM = 25.9 \pm 1.1 years; range = 20-34; 10 males) and fourteen healthy older participants (**O**; mean age \pm SEM = 66.3 \pm 1.4 years; range = 60-79; 7 males) were included in this part of the study. Both groups had comparable years of education (mean years \pm SEM: **Y**: 16.25 \pm 0.68; **O**: 14.86 \pm 0.88; $F_{1,24} = 1.7$, $p = 0.2$). No participant reported any auditory deficit or any history of psychiatric or neurological illness. They all provided written informed consent and were compensated 80 CAD\$/hour for their participation to the study.

In order to screen for mild cognitive impairments (MCI), the Montreal Cognitive Assessment (MoCA) was administered (Nasreddine et al., 2005). Due to logistic reasons, three young adults could not be evaluated. However, these missing data were circumscribed to young high functioning adults, who would improbably present such a MCI. All participants tested with the MoCA in the young group showed normal performance (i.e. total score \geq 26; Nasreddine et al., 2005). In the older adults group, three participants obtained scores suggestive of a mild cognitive impairment (i.e. total score $<$ 26; Nasreddine et al., 2005) and were thus excluded from further analyses. MoCA scores in the remaining older participants were still significantly lower than those of the young participants (mean score \pm SEM: **Y**: 28.9 \pm 0.3; **O**: 27.5 \pm 0.3; $F_{1,24} = 9.76$, $p < 0.01$).

Adaptive discrimination task. The participants that performed the functional voice area localizer also completed the adaptive discrimination task. However, only the scores of the ones who performed above chance level at the behavioral task were kept. Two young and two older

adults, apparently unable to execute the task were thus excluded from the statistical analysis. The participants included in the present study were thus 14 young adults (mean age \pm SEM = 26.8 \pm 1 years; range = 21-34; 10 males) and 12 older adults (mean age \pm SEM = 66.7 \pm 1.6 years; range = 60-79; 5 males). There was no significant difference in years of education between the resulting two groups (mean years \pm SEM: **Y**: 16 \pm 0.7; **O**: 14.9 \pm 1; $F_{1,20} = 0.81$, $p = 0.38$). Again, MoCA scores were lower for older than young participants (mean score \pm SEM: **Y**: 29.4 \pm 0.23; **O**: 27.4 \pm 0.47; $F_{1,20} = 12.5$, $p < 0.01$). All the scores were nevertheless above the clinical cut-off value, suggesting the absence of abnormal cognitive decline in the older adults group (Nasreddine et al., 2005).

Experimental Design

Functional voice area localizer. Participants were scanned in a 3T fMRI scanner (TRIO, Siemens, Erlangen, Germany) in a passive auditory listening task based on the procedures described in Belin et al. (2000) and Gervais et al. (2004). Two types of auditory stimuli were presented in a block design: vocal stimuli and non vocal stimuli. Twenty different blocks of each type were presented in a pseudorandom order, lasting each eight seconds. Blocks of eight seconds of silence were also presented, and a ten seconds TR was used. All the sounds were normalized for RMS.

Vocal blocks were composed of speech (words in French, English and other languages as well as non words) and non-speech (laughs, sighs, cough & onomatopoeia) stimuli. Sounds that did not involve vocal cord vibrations, like whispers, were not included. Non vocal blocks consisted of industrial and environmental sounds, as well as animal vocalizations. One hundred and ninety eight different stimuli were used to create the forty blocks (99 speakers and 99 non vocal auditory sources; 16 bit, mono, 22 050 Hz sampling rate). The voice area localizer is available at http://vnl.psy.gla.ac.uk/resources_main.php. The total duration of the task was 10 minutes, during which participants were instructed to passively listen to the sounds with their eyes closed. The auditory stimuli were presented binaurally at a level of approximately 90dB (HL) using HP S101 MR confon headphones (MR confon GmbH, Magdeburg, Germany).

Adaptive discrimination task. Participants were scanned in an event-related design while performing an auditory discrimination task. Pairs of stimuli drawn from a male-female voice gender continuum generated via morphing (see below for additional details) were presented binaurally through headphones. For the two runs of the adaptive discrimination task (i.e. high and low performance runs), 75 pairs of paralinguistic vocalizations were presented in a window during which there was no scanner sound: 60 pairs consisting of different vocalizations and 15 pairs consisting of identical vocalizations (catch trials). The catch trials were used to insure participants were properly doing the task. Each vocalization lasted 300 ms, and stimuli forming a pair were separated by a 200 ms delay. Scans were acquired 200ms following the presentation of the auditory pairs, i.e. during the response window (participants gave their answers by pressing a button). The interval between the presentation of the auditory stimuli and images acquisition is at least twice as long as the critical window during which a backward masking effect can occur (100 ms; Elliott, 1971). The stimulus pair as a whole was designed as an event. The subjects were asked to close their eyes and to indicate whether the two sounds of a pair were identical or not. They responded via a fiber optic response box (Inline Model HH-1x4-L, Current Designs, Philadelphia, USA) by pressing a button for 'Same' and another one for 'Different'. The adaptive design of the task was based on Levitt's transformed up-down procedure (Levitt, 1970), which elegantly allows to measure brain activity at specific predetermined performance levels. Two levels of task performance were used: low task performance (L; theoretical level of 70.7% correct; '2 down-1 up') and high task performance (H; theoretical level of 84.1% correct; '4 down-1 up'). For the L trials, two consecutive correct answers were necessary to induce the reduction of the physical distance (numbers of morphing steps) between the sounds of the pair, while a single incorrect answer would increase it. Four consecutive correct answers were necessary to decrease the morphing step in the H trials. Discrimination thresholds were measured as the morphing step difference between two sounds of a pair, averaged over the last six reversals (i.e., shifts from 'up' to 'down' or vice-versa). The task duration was approximately 20 minutes.

The two tasks were created using Media Control Function (MCF; Digivox, Montreal). Sound stimuli were also controlled using MCF, and for them both, the auditory stimuli were presented at a mean of 85–90 dB pressure level using the MRI-compatible electrodynamic

earphone (MR Confon HP Sl01, Magdeburg, Germany; impedance 250; sensitivity: 1mV/158VRMS/107 dB). The excellent electrodynamic quality of the headphones as well as the intensity at which the stimuli were presented ensured the accurate perception of the sounds by the participants in the scanner.

Stimuli

To create the vocal stimuli presented in the task, a voice gender continuum with 251 steps was generated between a male and a female voice pronouncing the syllable /had/ using a modified version of the morphing technique described by Kawahara & Matsui (2003). A pitch-adaptive spectral envelope extractor, as the one implemented in STRAIGHT (http://www.wakayama-u.ac.jp/~kawahara/STRAIGHTadv/index_e.html) was used to perform a decomposition of the vocal male and female stimuli in source and fundamental frequency (f_0) characteristics, yielding a smooth spectro-temporal representation of the signals. A set of parametric representations derived from this decomposition was then linearly interpolated between the two extremes and re-synthesized to obtain stimuli morphed between the original male and female stimuli. The duration of each morphed stimulus was 300 ms (16 bit, mono, 16 000 Hz sampling rate). All sounds were normalized for RMS.

Statistical analyses

The demographic and cognitive information, as well as the behavioral data from the adaptive discrimination task (percents correct and discrimination thresholds) were analyzed using SPSS 19. For both datasets (L and H trials), the normality of the distributions was first investigated: the distributions were considered normal if their kurtosis and skewness values were both comprised between -3 and 3 (Tabachnik & Fidel, 2007). The demographic and cognitive information of both age-groups (age, years of education and MoCA scores) were compared using a multivariate variance analysis (MANOVA). For the two groups, the data obtained from the adaptive discrimination task were analyzed using a two factor mixed ANOVA. The Greenhouse-Geisser estimate was considered since it assumes maximum violation of the

assumption of sphericity, and is thus quite conservative. When necessary, Tukey *post-hoc* analyses were used. In those cases, since group sizes were not equal, harmonic *N*s were calculated and used in the *post-hoc* analyses.

fMRI data acquisition and analysis

Voice area localizer. The functional scans were done using a single-shot T2*-weighted pulse sequence (TR= 10000 ms, delay in TR= 8000ms, TE = 30ms, flip angle = 90°, voxel size =3.0 x 3.0x 3.0 mm, FOV 192 x 192mm, acquisition matrix = 64x64, slice thickness = 3.0mm; number of volumes=62; scan time: 10:32).

The fMRI EPI data were processed according to standard procedures using spm5 (Wellcome Department of Imaging Neuroscience, London, UK; Friston et al., 1995) implemented in Matlab 7.1 (MathWorks, Natick, MA, USA). Initially, in order to reduce movement artifact, all the scans were realigned to the first image of the run, and a mean image was created. This mean image was smoothed with a Gaussian kernel of 6 mm full-width at half maximum (FWHM) and coregistered to the anatomical T1-weighted image. To normalize the anatomical images and the EPIs to a standard reference system (Talairach and Tournoux, 1988), the T1 anatomical images were segmented into gray matter and white matter. Then, the anatomical gray matter images were smoothed (6mm FWHM) and normalized to the gray matter of the Montreal Neurological Institute (MNI) brain. Subsequently, the derived normalization parameters were applied to the EPIs, which were sampled to a voxel size of 2 x 2 x 2 mm and smoothed with a Gaussian kernel of 6 mm FWHM. The statistical analyses done used a mass-univariate approach based on General Linear Models (Friston et al., 1995a,b).

Three experimental conditions were modeled: V (vocal sounds), NV (non vocal sounds) and baseline i.e. ‘silent’ null-events (SIL; the scanner background noise was continuous). Statistically, a first-level model using a delayed boxcar function convolved with a canonical hemodynamic response function was created. The two contrasts of interest (‘V > SIL’; ‘NV > SIL’) were estimated for each subject individually. Subsequently, a second-level random-effects analysis contrasting ‘V > SIL’ and ‘NV > SIL’ activation maps for Y and O was done. Consequently,

a mixed paired-sample 2x2 full factorial design with age group (Y, O) and stimulus (V, NV) as factors was performed.

Adaptive discrimination task. The two functional runs of the adaptive task (L and H) were performed following the voice area localizer and their order of presentation was counterbalanced among participants and age groups so that half the participants started with the low performance run while the other half started with the high performance run.

The parameters used were the following: TR = 3000ms, delay in TR = 1100ms, TE = 30ms, flip angle = 90°, voxel size = 3.0 x 3.0 x 3.0 mm, FOV 192 x 192mm, acquisition matrix= 64x64, slice thickness a = 3.0mm, number of volumes=205; scan time: 10 min).

The spatial pre-processing was identical to that done for the voice area localizer experiment. However, prior to it, we corrected the differences in image acquisition time between the slices by doing a slice timing correction. This adjustment aims to suppress the bias in quantitative parameter estimates at the single-subject level which may enhance the sensitivity of statistical inferences (Sladky et al, 2011).

For each subject and for the two task performance levels, a first-level analysis with the contrast ‘all stimuli vs. baseline’ (i.e. scanning periods between auditory stimuli), was performed in order to confirm that bilateral regions of the auditory cortex were clearly activated. A False Discovery Rate (FDR) correction was systematically applied with a p value < 0.05 in order to diminish the occurrence of Type I errors (i.e. false alarms). To assess eventual differences between groups, a full-factorial design analysis was conducted contrasting pairs leading to correct answers and the silent baseline. The main effects of age-group and task performance level were assessed, as well as their interaction. In order to examine possible relationships between behavioral performance and cerebral activations, Marsbar was used to extract the average activity in the areas significantly influenced by the main effects, and linear regressions were performed across subjects using the discrimination thresholds as the dependent variables and the activation beta values as the independent variable (SPSS 19).

Anatomical scans. At the end of the functional runs, a T-1 weighted structural MRI was obtained using a standard 3D fast-spoiled gradient-echo pulse sequence (TR = 2300ms, TE = 2.98ms, inversion recovery preparation time=900ms, flip angle=90 °, field of view = 256 mm x 240 mm, acquisition matrix 256 x 256, sagittal slices, slice thickness = 1.2mm, voxel size = 1.0x 1.0 x 1.2mm).

RESULTS

Voice area localizer

A full brain, voxel-wise mixed factorial analysis with age group (Y, O) and stimulus category (V, NV) as factors was performed on the individual contrasts of V vs. baseline and NV vs. baseline (Fig. 1a). A significant main effect of stimulus category was observed in bilateral middle STS regions, in the classical location of the TVA, with significantly greater response to V vs. NV sounds for both young and older participants (FDR; $p_{\text{corrected}} < 0.05$). Separate group analyses for O and Y revealed comparable TVA in the two groups (Fig. 1b & c) as indicated by the lack of a significant interaction between age group and stimulus category.

--Insert Figure 1 About Here--

Significant effect of age was observed in regions outside the TVA (FDR; $p_{\text{corrected}} < 0.05$): areas in the right anterior STS (aSTS), the left superior frontal gyrus (SFG) and the left supramarginal gyrus (SG) showed greater activity in O for both the vocal and non vocal sounds (Fig. 2).

--Insert Figure 2 About Here--

Conversely, Y presented greater mean global activation in the left transverse temporal gyrus (TTG) compared to O (FDR; $p_{\text{corrected}} < 0.05$; Fig. 3).

--Insert Figure 3 About Here--

Adaptive discrimination task

Behavioural data. As expected given the adaptive discrimination procedure used, no significant main effect of age was observed for the percent correct hits: the adaptive discrimination task resulted in comparable performance levels across age groups (Fig. 4; $F_{1,24} = 2.66$; $p = 0.116$), a pre-requisite for meaningful comparisons across groups. There was no significant main effect of age for the discrimination thresholds either ($F_{1,24} = 2.79$; $p = 0.108$). The main effect of task was significant for both the percent hits (Greenhouse-Geisser $F_{1,24} = 142.24$; $p < 0.001$; partial eta squared = 0.86) and the discrimination thresholds (Greenhouse-Geisser $F_{1,24} = 20.85$; $p < 0.001$; partial eta squared = 0.465). Tukey *post-hoc* analyses indicated that, as expected, the percent hits were greater and the discrimination thresholds lower for the high task performance trial. The interaction between our two factors did not reach significance for the percent hits (Greenhouse-Geisser $F_{1,24} = 0.13$, $p = 0.72$) nor the discrimination thresholds (Greenhouse-Geisser $F_{1,24} = 0.21$, $p = 0.65$).

--Insert Figure 4 About Here--

fMRI data. The adaptive discrimination task elicited a wide network of activations compared to the baseline, including temporal, frontal and parietal areas (Fig. 5).

--Insert Figure 5 About Here--

Individual maps of the contrasts between stimuli leading to correct answers vs. the baseline were entered in a mixed 2x2 factorial design with age group (Y, O) and performance level (H, L) as factors. A main effect of age group was observed: O recruited cerebral areas in the frontal (medial & left inferior frontal gyri, MFG & IFG) and temporal (left STG) lobes that young participants did not engage (FDR; $p_{\text{corrected}} < 0.05$; Fig. 6). There were no main effects of task performance level, nor any interaction between age-group and performance level.

--Insert Figure 6 About Here--

DISCUSSION

Several studies have reported the negative impact of aging on the processing of non linguistic information contained in human voice (among others, Orbelo et al. 2005; Fecteau et al., 2005; Allen & Brosgole, 1993; Brosgole & Weisman, 1995; Linville & Korabic, 1986). However, the presence of an age-related reorganization of the neural substrates underlying the preserved abilities has never been tested. The present study suggests for the first time that normal aging is accompanied by a reorganization of the cerebral networks underlying vocal processing, even when there is no focus on the processing of linguistic or emotional information.

Aging & the Temporal Voice Areas

In both young and older participants, passively listening to vocal vs. non vocal sounds elicited clear and similar bilateral TVA, as evidenced by the lack of significant age group x stimulus type interaction. Both TVA of young and older participants are thus comparable, suggesting that aging does not modify the way these specialized cortical areas are recruited for the processing of vocal information. However, compared to young participants, and for both vocal and non vocal sounds, older adults showed a reduced activity outside the TVA, in the left transverse temporal gyrus (TTG). Older participants therefore seem to be able to efficiently

recruit the specialized temporal areas typically involved in the processing of vocal information, but would not fully engage part of the auditory cortex.

In the perceptual domain, this age-related pattern of reduced primary cortices activations have been observed for the processing of speech (Cliff et al., 2012; Wingfield & Grossman, 2006; Hwang et al., 2007; Wong et al., 2009), visual shapes (Cliff et al., 2012 & Levine et al., 2000) and faces (Grady et al., 1994, Grady et al., 2000; Levine et al., 2000; Huettel & McCarthy, 2001; Lidaka et al., 2002; Castelli et al., 2010). Similar phenomenon could be interpreted as an age-related failure to optimally recruit neural systems, due to structural changes or to the installment of suboptimal strategies (see Reuter-Lorenz & Cappell, 2008 for review). Here, the presence of reduced left TTG recruitment for older adults appears crucial since it could lead to difficulties processing any kind of auditory information, including speech.

Concomitantly to the diminished left TTG activation, older participants engaged regions that young participants did not. Such extended age-related networks were also observed for the processing of linguistic information, and were interpreted as an attempt of compensation (see Wingfield & Grossman, 2006 for review). The age-related activation pattern we observe in our study implies that older participants needed to recruit additional neural networks in order to process the stimuli presented in the passive listening task. These additional networks could thus have been engaged to counterbalance the observed reduced activity of the auditory cortex (left TTG), which could suggest the installment of a compensatory age-related neural reorganization for the low-level auditory processing of non vocal stimuli.

Another explanation could be that due to a prolonged exposition to voice throughout their lifetime, older adults have developed a greater expertise in the processing of the information conveyed by voice. Auditory expertise had been well examined, mainly in musicians, and the majority of studies suggest that the prolonged practice of a musical instrument could modify the structures of the brain, as well as the networks underlying the processing of auditory stimuli, whether they are musical or not (see Levitin & Tirovolas, 2009 for review). While the expertise phenomenon has not yet been studied for vocal stimuli, it could be argued that humans, throughout their lives, develop an expertise for vocal sounds. Assuming that, older adults, who by definition lived longer, would have a greater expertise in the processing of vocal information compared to younger adults. Here, the age-related differences in the neural

networks underlying the passive listening task could be tributary to the instalment of expertise-related neurofunctional plasticity processes.

Neural compensation pattern during voice discrimination

As predicted due to the adaptive procedure used, the percent hits for the two performance levels were comparable across the two age-groups. Unexpectedly, so were the discrimination thresholds: on average, older participants needed larger acoustical differences to perform at the same level as young participants, but the difference was not statistically significant (Fig. 4).

During the discrimination task, older participants recruited cerebral areas in the frontal and temporal regions that young subjects did not engage. The observed age-related neurofunctional modifications, associated with statistically similar discrimination thresholds for the two age-groups, highly suggest the instalment of neural compensation mechanisms: the recruitment of additional areas would have allowed older participants to perform similarly to younger ones at the paralinguistic vocal discrimination task. The older adults we selected having MoCA scores superior to the clinical MCI cut-off, the neural compensation elicited could imply that they had a high level of cognitive reserve, which allowed them to maintain a performance level similar to the one of younger adults (Stern, 2009 & Tucker & Stern, 2011 for review).

Distinct age-related patterns for the passive listening and the adaptive discrimination tasks

In this study, we found that for the processing of vocal stimuli, older age was associated with reduced activations in the left temporal cortex, and the recruitment of additional frontal, temporal and parietal regions. However, the areas showing a significant main effect of age for the passive listening and the discrimination task do not overlap.

One explanation for these distinct patterns could be the difference in task requirements, as one experiment involved passive listening and the other one required participants to engage in a more demanding cognitive task. Indeed, it was shown that for the processing of vocal

information, speech in particular, the type of task could have a significant impact on the elicited patterns of activations (Binder et al., 2008). In addition, the degree of motivation or involvement while performing a task could also influence the elicited pattern of neural activation (Skelly & Decety 2012). Here, during the discrimination task, the main effect of age identified regions located in the prefrontal cortex, more specifically the inferior frontal gyrus, which is known to take part in higher order cognitive processing, like decision making (Talati & Hirsch, 2005; Miller & Cohen, 2001). In contrast, for the passive listening task, regions showing an effect of age were essentially located in cortical areas taking part in perceptual processing. Differences in task requirements may thus account for the dissimilar age-related patterns observed for the two tasks, the passive listening task recruiting networks underlying perceptual processing while the discrimination task engaged networks taking part in executive control.

However, even in the absence of overlap, the additional regions recruited by older adults are known to be involved in linguistic/vocal processing as well. For the passive listening task, older adults recruited regions in the superior temporal, superior frontal and supramarginal gyri. These regions are typically engaged respectively in voice recognition (Gainotti, 2011), emotional processing (Grandjean et al., 2005; Sander et al, 2005) and semantic decision (Price, 2010), and in vocalizations processing (Aboitiz et Garcia, 2009). During the discrimination task, part of the superior temporal gyrus was also additionally recruited by older adults. We also found an age-related over-recruitment of part of the medial and inferior frontal gyri, known to be respectively engaged in linguistic processing and the decoding of affective meaning of speech melody (Leitman et al., 2010b; Sander et al., 2005). This suggests that the age-related functional reorganization observed would involve cerebral regions that initially take part in a network underlying vocal/linguistic processing. Altogether, this age-related over-recruitment of cerebral regions typically underlying vocal/speech processing could allow older adults to maintain an efficient performance.

Adaptive discrimination task: same activation patterns for the low and high performance trials

For the discrimination task, we used a rigorous psycho-acoustical paradigm that allowed generating trials of distinct performance levels. When comparing our two age-groups, the main

effect of performance level, and the age x performance level interaction were not statistically significant.

This suggests that the cerebral networks engaged by the voice discrimination tasks were similar for the lower and higher performance levels. Some studies showed that the activation patterns generated by low and high levels of task demand are distinct for younger and older adults: more extended networks were generally observed for senior participants during the less demanding task, while a comparable pattern could be seen in younger adults but only for higher levels of task demands (Cappell, Gmeindl & Reuter-Lorenz, 2006; Mattay et al., 2006). To account for this phenomenon, the Compensation-Related Utilization of Neural Circuits Hypothesis (CRUNCH) was suggested (Reuter-Lorenz & Cappell, 2008 for review). This framework suggests that in order to remain as effective as a younger brain, the aging brain needs to engage extended neural resources to palliate for processing ineffectiveness. This additional activation, which plays a compensatory function, would take place at lower levels of task demand. Increasing the demands would eventually lead to an inadequate processing, inducing an age-associated performance drop for more difficult task. However, contrary to this hypothesis, we did not observe, for the high performance level, a more extensive neural activation for older participants only – rather both young and older participants showed comparable patterns of activation for both performance levels, as indicated by the lack of significant interaction between age and performance level. As the CRUNCH hypothesis is mostly based on data from studies having examined higher-order cognitive functions, essentially using working memory tasks, our patterns of results suggests that the CRUNCH hypothesis cannot be generalized to more perceptual tasks such as the one we used here.

In conclusion, we reported an age-related over-recruitment of temporal, frontal and parietal cortical regions during the passive listening of vocal and non vocal stimuli, and during the discrimination of vocal stimuli along non linguistic dimensions. Despite the fact that both groups performed at comparable levels during the discrimination task, older participants recruited additional regions of the temporal and frontal lobes which were not recruited by younger participants. The age-related activation patterns for both tasks suggest the presence of neural compensation, to which a high level of cognitive reserve could possibly contribute.

Overall, these results suggest the evidence of an age-related reorganization of the neural networks underlying the processing of non linguistic aspects of vocal sounds.

Acknowledgements

This work was supported by CIHR doctoral award to Guylaine Bélizaire. We would like to thank the *Unité de Neuroimagerie Fonctionnelle* of the *Centre de Recherche de l'Institut Universitaire de Gériatrie de Montréal*.

Disclosure statement

The authors disclose no conflicts of interest. The Institutional Review Board at each site approved the study methods, and all participants gave written informed consent.

REFERENCES

- Aboitiz F. & García R., 2009. Merging of phonological and gestural circuits in early language evolution. *Rev Neurosci.* 20(1), 71-84.
- Allen R., Brosgole L., 1993. Facial and auditory affect recognition in senile geriatrics, the normal elderly and young adults. *Int J Neurosci.* 68, 33-42.
- Andrews-Hanna J.R., Snyder A.Z., Vincent J.L., Lustig C., Head D., Raichle M.E., Buckner R.L., 2007. Disruption of large-scale brain systems in advanced aging. *Neuron*, 56, 924-935.
- Belin P., Zatorre R.J., Lafaille P., Ahad P., Pike B., 2000. Voice-selective areas in human auditory cortex. *Nature.* 403, 309-12.
- Belin P., Zatorre R.J., Ahad P., 2002. Human temporal-lobe response to vocal sounds. *Brain Res Cogn Brain Res.* 13, 17-26.
- Belin P., Fecteau S., Bédard C., 2004. Thinking the voice: neural correlates of voice perception. *Trends Cogn Sci.* 8, 129-35.
- Belin P., 2006. Voice processing in human and non-human primates. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci.* 361, 2091-107.
- Binder J.R., Swanson S.J., Hammeke T.A., Sabsevitz D.S., 2008. A comparison of five fMRI protocols for mapping speech comprehension systems. *Epilepsia.* 12, 1980-1997.
- Brosgole L., Weisman J., 1995. Mood recognition across the ages. *Int J Neurosci.* 82, 169-189.

Buckner R.L., Sepulcre J., Talukdar T., Krienen F.M., Liu H., Hedden T., Andrews-Hanna J.R., Sperling R.A., Johnson K.A., 2009. Cortical hubs revealed by intrinsic functional connectivity: mapping, assessment of stability, and relation to Alzheimer's disease. *J Neurosci.* 29, 1860-1873.

Cabeza R., 2002. Hemispheric asymmetry reduction in older adults: the HAROLD model. *Psychol Aging.* 17, 85-100.

Cabeza R., Anderson N.D., Locantore J.K., McIntosh A.R., 2002. Aging gracefully: compensatory brain activity in high-performing older adults. *Neuroimage.* 17, 1394-402.

Cabeza, R., Daselaar, S.M., Dolcos, F., Prince, S.E., Budde, M., Nyberg, L., 2004. Task-independent and task-specific age effects on brain activity during working memory, visual attention and episodic retrieval. *Cereb. Cortex* 14, 364–375.

Castelli I., Baglio F., Blasi V., Alberoni M., Falini A., Liverta-Sempio O., Nemni R., Marchetti A., 2010. Effects of aging on mindreading ability through the eyes: an fMRI study. *Neuropsychologia.* 48, 2586-2594.

Davis S.W., Dennis N.A., Daselaar S.M., Fleck M.S., Cabeza R., 2008. Que PASA? The posterior-anterior shift in aging. *Cereb Cortex.* 18, 1201-9.

Elliott L.L., 1971. Backward and Forward Masking. *Audiol.* 10, 65-76.

Ethofer T., Wiethoff S., Anders S., Kreifelts B., Grodd W., Wildgruber D., 2007. The voices of seduction: cross-gender effects in processing of erotic prosody. *Soc Cogn Affect Neurosci.* 2, 334-337.

Fecteau S., Armony J.L., Joannette Y., Belin P., 2005. Judgment of emotional nonlinguistic vocalizations: age-related differences. *Appl Neuropsychol.* 12, 40-48.

- Frisina D.R., Frisina R.D., 1997. Speech recognition in noise and presbycusis: relations to possible neural mechanisms. *Hear Res.* 106, 95-104.
- Friston K.J., Holmes A.P., Poline J.B., Grasby P.J., Williams S.C., Frackowiak R.S., Turner R., 1995. Analysis of fMRI time-series revisited. *Neuroimage.* 2, 45-53.
- Friston K.J., Frith C.D., Turner R., Frackowiak R.S., Characterizing evoked hemodynamics with fMRI. *Neuroimage.* 2, 157-165.
- Gainotti G., 2011. What the study of voice recognition in normal subjects and brain-damaged patients tells us about models of familiar people recognition. *Neuropsychologia.* 49, 2273-2282.
- Gervais H., Belin P., Boddaert N., Leboyer M., Coez A., Sfaello I., Barthélémy C., Brunelle F., Samson Y., Zilbovicius M., 2004. Abnormal cortical voice processing in autism. *Nat Neurosci.* 7, 801-802.
- Grady C.L., Maisog J.M., Horwitz B., Ungerleider L.G., Mentis M.J., Salerno J.A., Pietrini P., Wagner E., Haxby J.V., 1994. Age-related changes in cortical blood flow activation during visual processing of faces and location. *J Neurosci.* 14, 1450-1462.
- Grady C.L., McIntosh A.R., Horwitz B., Rapoport S.I., 2000. Age-related changes in the neural correlates of degraded and nondegraded face processing. *Cogn Neuropsychol.* 17, 165-186.
- Grady C.L., Protzner A.B., Kovacevic N., Strother S.C., Afshin-Pour B., Wojtowicz M., Anderson J.A., Churchill N., McIntosh A.R., 2010. A multivariate analysis of age-related differences in default mode and task-positive networks across multiple cognitive domains. *Cereb Cortex.* 6, 1432-1447.

- Grandjean D., Sander D., Pourtois G., Schwartz S., Seghier M.L., Scherer K.R., Vuilleumier P., 2005. The voices of wrath: brain responses to angry prosody in meaningless speech. *Nat Neurosci.* 8, 145-146.
- He N., Dubno J.R., Mills J.H., 1998. Frequency and intensity discrimination measured in a maximum-likelihood procedure from young and aged normal-hearing subjects. *J Acoust Soc Am.* 103, 553-565.
- He N.J., Mills J.H., Dubno J.R., 2007. Frequency modulation detection: effects of age, psychophysical method, and modulation waveform. *J Acoust Soc Am.* 122, 467-477.
- Huettel S.A., McCarthy G., 2001. Regional differences in the refractory period of the hemodynamic response: an event-related fMRI study. *Neuroimage.* 14, 967-976.
- Hwang J.H., Li C.W., Wu C.W., Chen J.H., Liu T.C., 2007. Aging effects on the activation of the auditory cortex during binaural speech listening in white noise: an fMRI study. *Audiol Neurootol.* 12, 285-294.
- Iidaka T., Okada T., Murata T., Omori M., Kosaka H., Sadato N., Yonekura Y., 2002. Age-related differences in the medial temporal lobe responses to emotional faces as revealed by fMRI. *Hippocampus.* 12, 352-362.
- Kawahara H., Matsui H., 2003. Auditory morphing based on an elastic perceptual distance metric in an interference-free time-frequency representation, *Proc. ICASSP*, 1, 256-259.
- Kreifelts, B., T. Ethofer, T. Shiozawa, et al. 2009. Cerebral representation of non-verbal emotional perception: fMRI reveals audiovisual integration area between voice- and face-sensitive regions in the superior temporal sulcus. *Neuropsychologia.* 47, 3059–3066.

- Kriegstein K.V., Giraud A.L., 2004. Distinct functional substrates along the right superior temporal sulcus for the processing of voices. *Neuroimage*. 22, 948-955.
- Leitman D.I., Wolf D.H., Ragland J.D., Laukka P., Loughhead J., Valdez J.N., Javitt D.C., Turetsky B.I., Gur R.C., 2010 "It's Not What You Say, But How You Say it": A Reciprocal Temporo-frontal Network for Affective Prosody. *Front Hum Neurosci*. 26, 4-19.
- Levine B.K., Beason-Held L.L., Purpura K.P., Aronchick D.M., Optican L.M., Alexander G.E., Horwitz B., Rapoport S.I., Schapiro M.B., 2000. Age-related differences in visual perception: a PET study. *Neurobiol Aging*. 21, 577-584.
- Levitin, D.J. & Tirovolas, A.K. (2009). Current advances in the cognitive neuroscience of music. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1156, 211-231.
- Levitt H., 1970. Transformed up-down methods in psychoacoustics. *J Acoust Soc Am*. 49, 467-477.
- Linville S.E., Korabic E.W., 1986. Elderly listeners' estimates of vocal age in adult females. *J Acoust Soc Am*. 80, 692-4.
- Miller, E.K. & Cohen, J.D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual Review of Neuroscience*, 24, 167-202.
- Moore B.C., Peters R.W., Glasberg B.R., Detection of temporal gaps in sinusoids by elderly subjects with and without hearing loss. *J Acoust Soc Am*. 92, 1923-1932.
- Nasreddine Z.S., Phillips N.A., Bédirian V., Charbonneau S., Whitehead V., Collin I., Cummings J.L., Chertkow H., 2005. The Montreal Cognitive Assessment, MoCA: a brief screening tool for mild cognitive impairment. *J Am Geriatr Soc*. 53, 695-9.

Orbelo D.M., Grim M.A., Talbott R.E., Ross E.D., 2005. Impaired comprehension of affective prosody in elderly subjects is not predicted by age-related hearing loss or age-related cognitive decline. *J Geriatr Psychiatry Neurol.* 18, 25-32.

Patterson R.D., Johnsrude I.S., 2008. Functional imaging of the auditory processing applied to speech sounds. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci.* 363, 1023-35.

Park, D.C., Polk, T.A., Mikels, J., Taylor, S.F., Marshuetz, C., 2001. Cerebral aging: integration of brain and behavioral models of cognitive function. *Dialogues. Clin. Neurosci.* 3,151–165.

Park, D.C., Welsh, R.C., Marshuetz, C., Gutchess, A.H., Mikels, J., Polk, T.A., Noll, D.C., Taylor, S.F., 2003. Working memory for complex scenes: age differences in frontal and hippocampal activations. *J. Cogn. Neurosci.* 15, 1122–1134.

Park D.C., Polk T.A., Hebrank A.C., Jenkins L.J., 2010. Age differences in default mode activity on easy and difficult spatial judgment tasks. *Front Hum Neurosci.* 3, 75.

Pichora-Fuller M.K., Souza P.E., 2003. Effects of aging on auditory processing of speech. *Int J Audiol.* 42, 11-16.

Payer, D., Marshuetz, C., Sutton, B., Hebrank, A., Welsh, R.C., Park, D.C., 2006. Decreased neural specialization in old adults on a working memory task. *NeuroReport* 17, 487–491.

Price C.J., 2010. The anatomy of language: a review of 100 fMRI studies published in 2009. *Ann N Y Acad Sci.* 1191, 62-88.

Rajah, M.N., D’Esposito, M., 2005. Region-specific changes in prefrontal function with age: a review of pet and fMRI studies on working and episodic memory. *Brain* 128, 1964–1983.

- Reuter-Lorenz P.A., Cappell K.A., 2008. Neurocognitive aging and the compensation hypothesis. *Curr Dir Psychol Sci.* 17, 177-182.
- Sander D., Grandjean D., Pourtois G., Schwartz S., Seghier M.L., Scherer K.R., Vuilleumier P., 2005. Emotion and attention interactions in social cognition: brain regions involved in processing anger prosody. *Neuroimage.* 28(4), 848-858.
- Skelly L.R., Decety J., 2012. Passive and motivated perception of emotional faces: qualitative and quantitative changes in the face processing network. *PLoS One.* 6, e40371.
- Sladky R., Friston K.J., Tröstl J., Cunnington R., Moser E., Windischberger C., 2011. Slice-timing effects and their correction in functional MRI. *Neuroimage.* 58, 588-594.
- Tabachnick B.G., Fidell, L. S., 2007. *Using Multivariate Statistics*, fifth ed. Allyn and Bacon, Boston.
- Talairach J. Tournoux P, 1988. *Co-Planar Stereotaxic Atlas of the Human Brain: 3-D Proportional System: An Approach to Cerebral Imaging*, first ed. Thieme, New York.
- Talati, A. & Hirsch, J. (2005). Functional specialization within the medial frontal gyrus for perceptual go/no-go decisions based on "what," "when," and "where" related information: an fMRI study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 17(7), 981-993.
- Thomas C., Moya L., Avidan G., Humphreys K., Jung K.J., Peterson M.A., Behrmann M., 2008. Reduction in white matter connectivity, revealed by diffusion tensor imaging, may account for age-related changes in face perception. *J Cogn Neurosci.* 2, 268-284.
- Tucker, A.M. & Stern, Y., 2011. Cognitive reserve in aging. *Curr Alzheimer Res.*, 8, 354-360.

Von Kriegstein K., Kleinschmidt A., Sterzer P., Giraud AL., 2005. Interaction of face and voice areas during speaker recognition. *J Cogn Neurosci.* 17, 367-376.

Voss M.W., Erickson K.I., Chaddock L., Prakash R.S., Colcombe S.J., Morris K.S., Doerksen S., Hu L., McAuley E., Kramer A.F., 2008. Dedifferentiation in the visual cortex: an fMRI investigation of individual differences in older adults. *Brain Res.* 1244, 121-131.

Warren J.D., Scott S.K., Price C.J., Griffiths T.D., 2006. Human brain mechanisms for the early analysis of voices. *Neuroimage.* 31, 1389-97.

Wingfield A., Grossman M., 2006. Language and the aging brain: patterns of neural compensation revealed by functional brain imaging. *J Neurophysiol.* 96, 2830-2839.

Wong P.C., Jin J.X., Gunasekera G.M., Abel R., Lee E.R., Dhar S., 2009. Aging and cortical mechanisms of speech perception in noise. *Neuropsychologia.* 47, 693-703.

Table 1. Young and older adults' demographic, cognitive and psychological characteristics

<i>Voice Localizer</i>	Young Adults N = 16 M (sem)	Older Adults N = 14 M (sem)	F	p
Age	25.9 (1.10)	66.3 (1.40)	476	p < 0.01
Education (years)	16.2 (0.68)	14.9 (0.88)	1.69	0.21
MoCA	28.9 (0.30)	27.5 (0.40)	9.76	< 0.01
<i>Adaptive Discrimination</i>	Young Adults N = 14 M (sem)	Older Adults N = 12 M (sem)	F	p
Age	26.8 (1.0)	66.7 (1.60)	392	p < 0.01
Education (years)	16.0 (0.70)	14.9 (1.0)	0.81	0.38
MoCA	29.4 (0.23)	27.4 (0.47)	12.5	< 0.01

Figure 1. Brain activity for the processing of vocal stimuli in young and old participants

a) General TVA activations and mean signal change versus baseline for the two groups (main effect of stimulus category, two-factor mixed factorial analysis). Regardless of age, the mean BOLD signal is greater for vocal sounds compared to the non vocal ones. Right (global maxima): $x = 54, y = -24, z = 0$; F value = 40.77 (FDR; $p_{\text{corrected}} < 0.05$); Left: $x = -57, y = -12, z = -6$; $F = 34.42$ (FDR; $p_{\text{corrected}} < 0.05$).

b) TVA elicited for young participants: Left (global maxima): $x = -57, y = -12, z = 3$; T value = 12.40 (FDR; $p_{\text{corrected}} < 0.005$); Right: $x = 54, y = -33, z = 3$; T value = 11.21 (FDR; $p_{\text{corrected}} < 0.05$).

c) TVA elicited for old participants. Left (global maxima): $x = -60, y = -21, z = 3$; T value = 20.12 (FDR; $p_{\text{corrected}} < 0.05$); Right: $x = 48, y = -18, z = -6$; T value = 11.16 (FDR; $p_{\text{corrected}} < 0.05$).

Abbreviations: Y = Young adults; O = Older adults; V =vocal sounds; NV = non vocal sounds; TVA = Temporal Voice Areas

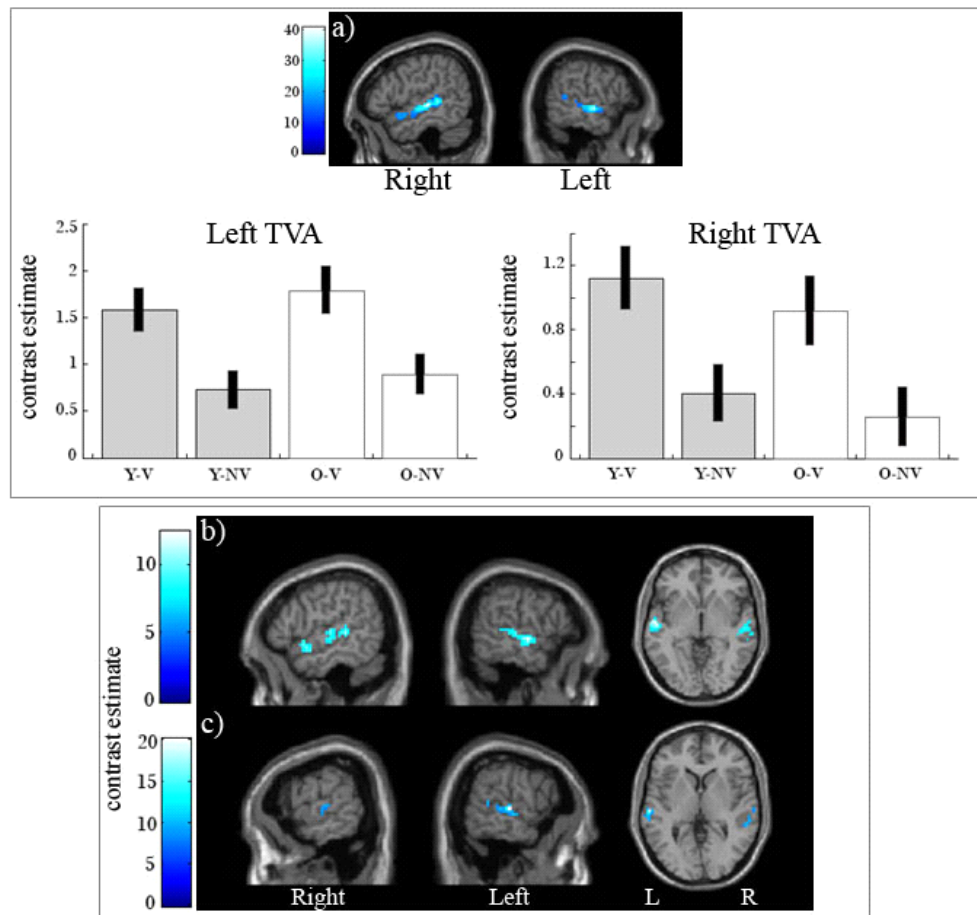


Figure 2. Main effect of age for the functional voice area localizer

While passively listening to auditory stimuli, old participants tend to recruit cerebral regions that young participants do not.

a) For old participants, the BOLD signal elicited in the extremity of the right STG is greater compared to young adults ($F = 34$; FDR; $p_{\text{corrected}} < 0.05$).

b & c) Old adult recruit areas of the left SFG and of the left SG that young participants do not (Left SFG: $F = 28.39$; FDR; $p_{\text{corrected}} < 0.05$; Left SG: $F = 25.38$; FDR; $p_{\text{corrected}} < 0.05$).

Abbreviations: Y = Young adults; O = Older adults; V =vocal sounds; NV = non vocal sounds

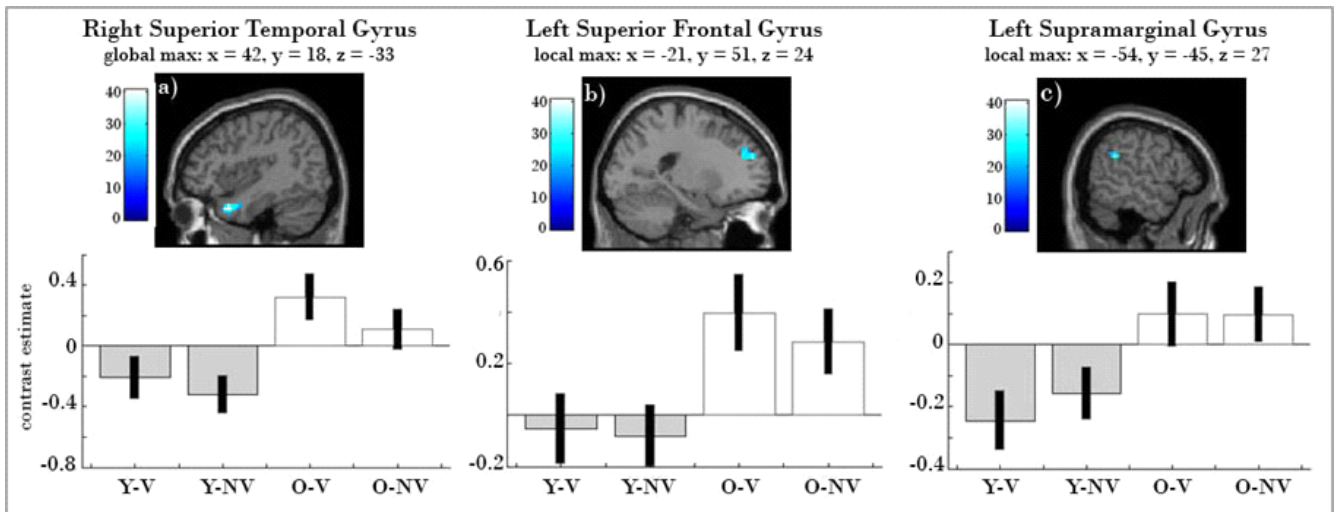


Figure 3. Negative effect of aging for the functional voice area localizer

For the passive listening task, a two-factor mixed factorial analysis indicates that Y show greater BOLD activation in the left TTG compared to O (FDR; $p_{\text{corrected}} < 0.05$; ; $F = 5.75$).

Abbreviations: Y = Young adults; O = Older adults; V =vocal sounds; NV = non vocal sounds

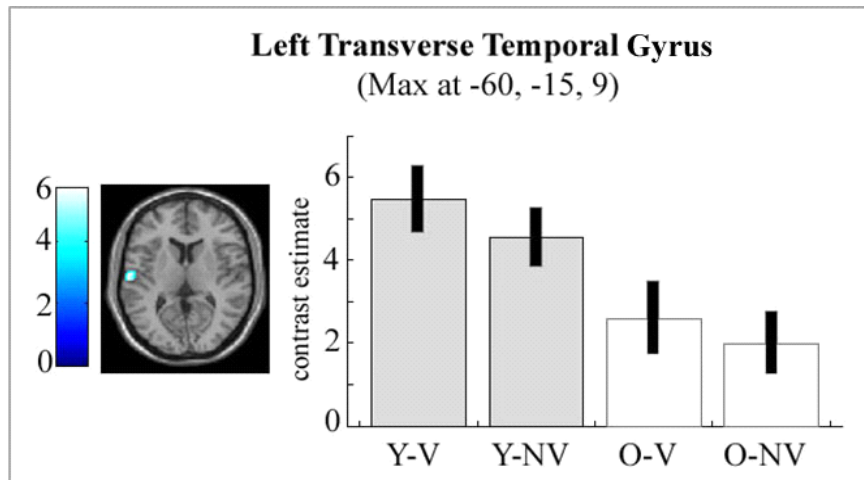


Figure 4. Behavioral performances for the auditory adaptive discrimination task

The percent correct answers and the discrimination thresholds are presented for each group and complexity levels. The performance level was higher, and discrimination thresholds lower, for the high-performance trial. Young and old participants performed at comparable levels of performance and obtained comparable discrimination thresholds.

** : $p < 0.001$; NS: non significant.

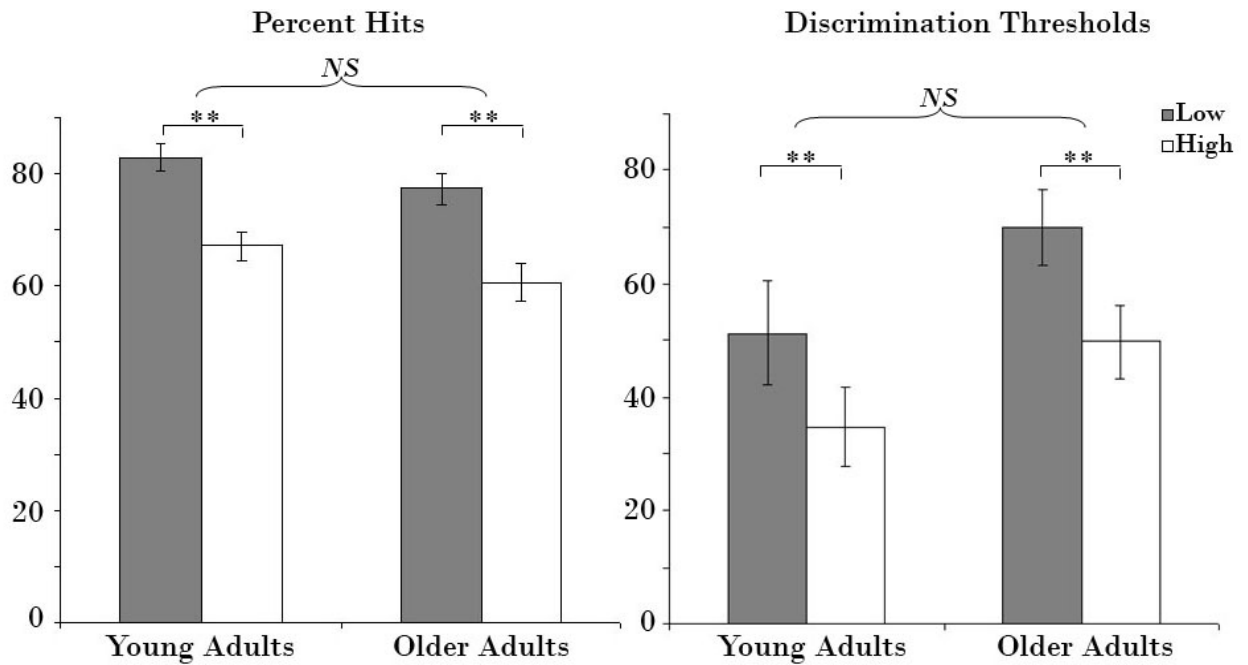


Figure 5. Brain activity during non linguistic vocal discrimination, for the low and high performance conditions

Both groups present temporal, frontal and parietal activation relative to the silent baseline. Global maxima are circled.

High performance condition: young participants (global max = -60, y = -24, z = 9; $F = 12.24$ (FDR; $p_{\text{corrected}} < 0.05$); old participants (x = 45, y = 36, z = 18; $F = 12.31$ (FDR; $p_{\text{corrected}} < 0.05$)).

Low performance condition: young participants (global max = -33, y = 24, z = -3; $F = 12.75$ (FDR; $p_{\text{corrected}} < 0.05$); old participants (x = 57, y = -9, z = -3; $F = 21.06$ (FDR; $p_{\text{corrected}} < 0.005$)).

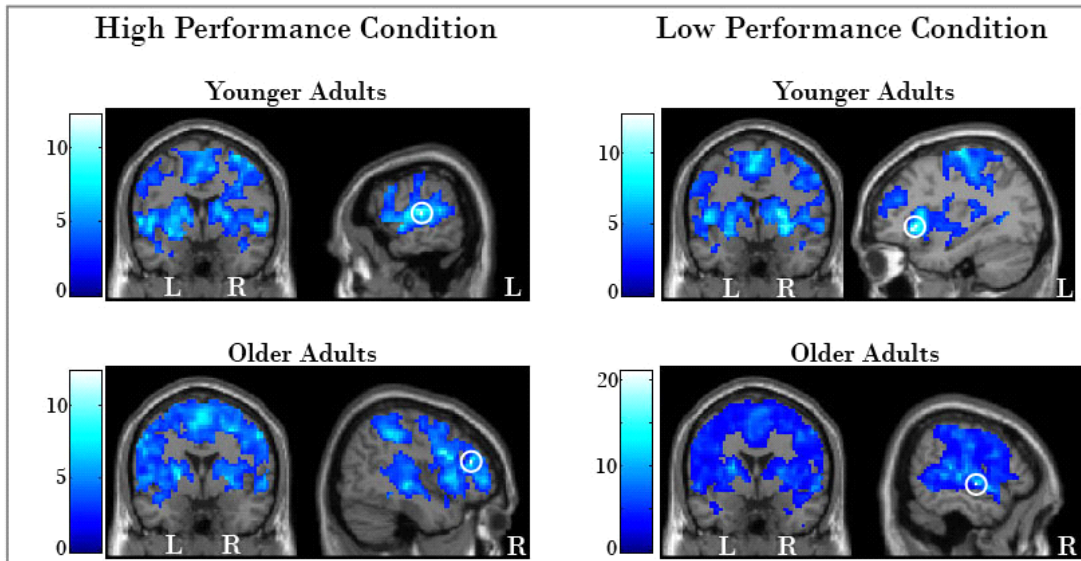
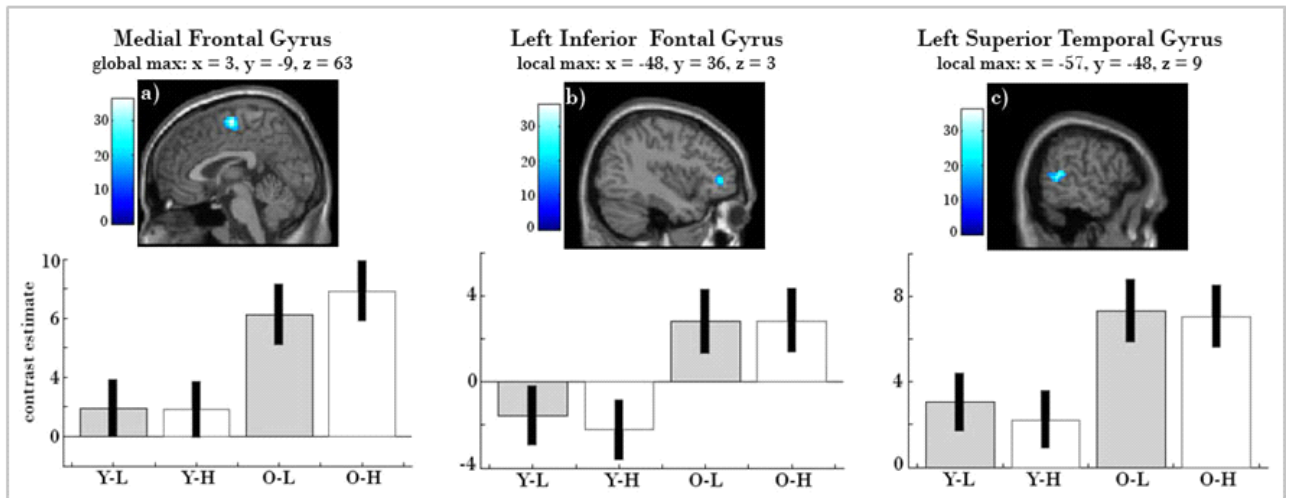


Figure 6. Main effect of age for the adaptive discrimination task

While performing auditory discrimination, old participants recruited regions that young participants did not.

a, b & c) Independently of the performance level, the mean cerebral activity of old participants is greater in the MFG ($F = 36.31$; FDR; $p_{\text{corrected}} < 0.05$), the left IFG ($F = 29.9$; FDR; $p_{\text{corrected}} < 0.05$) and the left STG ($F = 29$; FDR; $p_{\text{corrected}} < 0.05$).



CHAPITRE III

DISCUSSION GÉNÉRALE

3.1 RAPPEL DES OBJECTIFS

L'objectif général de cette thèse consistait à offrir une description plus précise des changements touchant les capacités de traitement paralinguistique vocal survenant au cours du vieillissement normal. L'approche préconisée, combinant la comparaison d'adultes jeunes et d'aînés sur l'axe comportemental (Article 1) ainsi que sur l'axe neuroradiologique (Article 2), permettait d'appréhender la question avec un angle novateur. En effet, très peu d'études empiriques comportementales et aucune étude de neuroimagerie ont été effectuées sur le sujet.

Les articles constituant ce travail sont respectivement résumés dans les sections 3.2 et 3.3 de ce chapitre. Afin de faciliter la lecture de cette discussion, les faits saillants des études sont présentés au début de chacune des sections du chapitre. Pour chacune de ces parties, les résultats sont discutés, et des hypothèses explicatives ainsi que des pistes de recherche future sont proposées. Ce chapitre de discussion se clôt par une section dans laquelle certains résultats de la thèse sont interprétés de manière intégrée.

3.2 VOLET 1 : VIEILLISSEMENT NORMAL & TRAITEMENT PARALINGUISTIQUE VOCAL – APPORTS COMPORTEMENTAUX

L'objectif du premier article de cette thèse était la comparaison des performances comportementales d'adultes jeunes et âgés lors de la réalisation d'une batterie évaluant les capacités de traitement paralinguistique vocal. La batterie d'évaluation de la perception vocale (batterie EPV) était composée de quatre tâches cognitives : une tâche de catégorisation de genre, une tâche de discrimination de sources sonores, une tâche adaptative de discrimination vocale ainsi qu'une tâche de mémorisation voix-cloches. Les différences entre les participants jeunes et âgés aux épreuves de la batterie EPV sont présentées dans le Tableau 2 et les Figures 1 à 4 du premier article (Chapitre II de ce travail).

3.2.1 IMPACT DIFFÉRENTIEL DU VIEILLISSEMENT NORMAL SUR LE TRAITEMENT PARALINGUISTIQUE VOCAL

Les résultats obtenus pour l'étude comportementale indiquent que pour trois des quatre tâches de la batterie EPV, la tâche adaptative de discrimination, la tâche de discrimination de sources sonores et celle de mémorisation voix-cloches, les adultes âgés performant moins bien que les jeunes adultes. Ainsi, en dépit du contrôle statistique pour des variables potentiellement médiatrices (acuité auditive et rendement cognitif général), la contribution de l'âge reste significative et les performances des participants âgés sont le plus souvent significativement inférieures à celles des adultes jeunes.

De manière plus précise, en ce qui concerne la tâche adaptative de discrimination, les aînés performant moins bien que les jeunes adultes lors du traitement de stimuli vocaux naturels, mais obtiennent des scores comparables à ceux des jeunes lors du traitement des stimuli vocaux uniformisés (fréquence fondamentale (f_0) moyennée). Pour la tâche de discrimination de sources sonores, les performances des adultes âgés sont inférieures à celles des plus jeunes, et ce indépendamment du type de stimuli (vocal ou musical). Enfin, en ce qui a trait à la tâche de mémorisation, les adultes jeunes sont généralement meilleurs que les aînés. Les participants âgés ont toutefois tendance à mieux reconnaître les sons de cloches que les sons vocaux, alors que les adultes jeunes performant de manière comparable pour le traitement des deux types de stimuli.

Le fait que, comparativement aux jeunes adultes, les aînés performant globalement moins bien à la batterie EPV confirme la présence d'une diminution liée à l'âge de l'efficacité du traitement auditif général (pour revue, voir Tun et al., 2012). Ces résultats appuient également les données rendant compte d'un déclin avec l'âge du traitement d'informations vocales de nature non affective, tel que la capacité à discriminer ou à identifier une intonation (ton interrogatif, déclaratif, exclamatif ou neutre; Allen & Brosgole, 1993; Brosgole & Weisman, 1995), ou encore le sarcasme (Orbelo et al., 2005). Lorsque ces derniers résultats sont considérés conjointement aux données provenant de la batterie EPV, un constat significatif ressort : il apparaît que le vieillissement normal affecte bel et bien les capacités permettant de reconnaître, de comprendre, de discriminer mais aussi de mémoriser les stimuli vocaux et ce, qu'ils soient de nature émotionnelle ou non.

Les résultats d'une tâche de la batterie EPV vont toutefois à l'encontre de cette conclusion, et pour les deux types de stimuli (voix naturelles ou voix avec une fo moyennée), les performances des adultes jeunes et âgés à la tâche de catégorisation de genre sont tout à fait comparables. Ce résultat indique que la frontière perceptuelle subjective distinguant une voix d'homme d'une voix de femme se situe, pour les deux groupes d'âge, à un niveau équivalent sur le continuum homme/femme utilisé. Une seule étude antérieure s'est intéressée à évaluer l'impact du vieillissement normal sur les capacités de catégorisation d'un matériel paralinguistique vocal non affectif et ce, à l'aide d'une tâche de catégorisation d'âge de vocalisations neutres (Linville & Korabic, 1986). Cette étude indique qu'en dépit d'une fiabilité réduite des performances des adultes âgés (qui sont moins constants dans la répartition de stimuli identiques), ces derniers classent tout de même globalement les vocalisations dans les mêmes catégories d'âge que les jeunes adultes. En analysant la contribution de différentes informations acoustiques dans la performance, Linville et Korabic (1986) mettent toutefois en évidence que malgré des catégorisations équivalentes, les aînés utilisent différemment les informations contenues dans les vocalisations afin d'exécuter la tâche comparativement aux jeunes adultes. Ainsi, pour arriver au même résultat, les deux groupes d'âge utiliseraient des stratégies différentes. Cette conclusion pourrait également s'appliquer aux résultats de la tâche de catégorisation de genres de la batterie EPV. Le protocole expérimental utilisé n'ayant pas été conçu pour évaluer la contribution spécifique, quant à la performance, des diverses caractéristiques acoustiques des stimuli, le présent travail ne permet pas de répondre avec certitude à cette question. Dans le futur, il serait donc intéressant de comparer, pour différentes tâches cognitives, et pour des groupes d'adultes jeunes et âgés, l'apport de certaines informations acoustiques (fo, formants, variation de la fo, etc.) dans la performance comportementale, ce qui permettrait d'explorer l'hypothèse de la mise en place de stratégies de traitement acoustique différentes avec l'âge.

La tâche de catégorisation de genre étant la seule de la batterie EPV pour laquelle les adultes jeunes et âgés ont obtenu des performances similaires, il est également possible que cette absence de disparité provienne d'un biais méthodologique inhérent à la tâche, et que cette dernière ne soit pas suffisamment sensible pour permettre d'éliciter des différences entre les adultes jeunes et âgés. Afin de répondre à cette question, une étude ultérieure pourrait utiliser une tâche de catégorisation de genre ayant un niveau de complexité plus élevé, ce qui

favoriserait la mise en évidence de disparités liées à l'âge. Pour ce faire, une condition utilisant des morphs (c.-à-d., un son formé de la juxtaposition temporelle et fréquentielle des caractéristiques acoustiques de deux sons naturels distincts) se situant plus près du centre du continuum homme/femme que ceux sélectionnés ici, et donc, étant plus ambigu, pourrait être ajoutée à la tâche. De la sorte, les performances de catégorisation de genre des adultes jeunes et âgés pourraient être comparées pour deux niveaux de complexité, et vraisemblablement, l'écart entre les scores des deux groupes d'âge sera plus marqué pour la condition plus ambiguë.

3.2.2 DIFFÉRENCES JEUNES-AÎNÉS : ARTÉFACT LIÉ AUX DIFFICULTÉS COGNITIVES & AUDITIVES OU RÉEL EFFET DE L'ÂGE?

L'incorporation, dans les analyses statistiques, de deux covariables estimant les fonctionnements auditif et cognitif a permis d'ajuster les effets mesurés en fonction de la contribution respective de ces facteurs. Au final, cela a eu pour avantage de nuancer la compréhension du phénomène observé, mais également de quantifier l'apport de l'intégrité cognitive et auditive dans le déclin lié à l'âge des performances de traitement paralinguistique vocal non affectif.

3.2.2.1 Contribution de l'acuité auditive

Pour deux des trois tâches de la batterie EPV où un effet de l'âge est observé, on retrouve également une contribution significative de l'acuité auditive, soit pour la tâche adaptative de discrimination (types de stimuli : morphs vocaux naturels et morphs vocaux avec une fo moyennée) et la tâche de mémorisation voix-cloches (deux types de stimuli : voix naturelles et sons de cloches).

De manière générale, ce résultat suggère la possibilité d'une action conjointe de l'âge et du déclin auditif quant à l'apparition de difficultés de traitement paralinguistique vocal. Et indépendamment de la modalité testée et du type de tâche utilisé, le déclin auditif semble influencer les performances de traitement vocal d'une manière constante. En effet, les participants ayant une bonne acuité auditive (c.-à-d., de petits seuils audiométriques) performent

de manière similaire aux deux types de stimuli (**tâche adaptative de discrimination** : voix naturelles et voix avec une fo moyennée; **tâche de mémorisation** : voix naturelles et sons de cloches), alors que ce n'est pas le cas pour ceux ayant une moins bonne acuité auditive. Dans ce dernier cas, les meilleurs scores sont obtenus, pour la discrimination des sons ayant une fo moyennée ainsi que pour la mémorisation des sons de cloches. Contrairement à ce qui a été mis en évidence pour le traitement d'informations paralinguistiques vocales affectives (Orbelo et al., 2005; Mitchell & Kingston, 2011), il semble donc que la présence de presbyacousie, ou encore de difficultés auditives en général, puisse entraver le décodage adéquat des informations paralinguistiques vocales non affectives. En ce sens, les données de l'étude comportementale présentées dans ce travail suggèrent qu'en ce qui a trait au traitement paralinguistique vocal non affectif, l'impact de la perte auditive s'avère plus préjudiciable que pour le traitement paralinguistique vocal de stimuli affectifs. Cet impact différentiel de l'acuité auditive sur le traitement de productions vocales pourrait provenir du fait que les modulations acoustiques permettant de véhiculer les informations auditives concernant l'état affectif d'un locuteur sont nettement plus saillantes que celles véhiculant son identité (pour revue, voir Brück, Kreifelts & Wildgruber, 2011). Par conséquent, le décodage des informations vocales non affectives, qui sont plus subtiles, dépendrait grandement de l'intégrité des capacités auditives.

3.2.2.2 Absence de contribution du fonctionnement cognitif global

En ce qui concerne le niveau de fonctionnement cognitif global, il en va autrement. Pour l'ensemble des tâches de la batterie EPV, les scores du MoCA ne semblent pas rendre compte de la différence de performances entre les adultes jeunes et les adultes plus âgés, les effets principaux et les interactions avec cette variable n'atteignant jamais le seuil de significativité statistique.

Les études s'étant intéressées à la relation entre le rendement cognitif et le traitement paralinguistique vocal l'ont essentiellement fait pour des stimuli de nature émotionnelle. Les résultats de la batterie EPV vont toutefois dans le même sens que ceux de ces travaux, puisque la plupart d'entre eux conclue que les mesures cognitives ne permettent pas de prédire, chez des adultes âgés, les performances de traitement de l'information paralinguistique émotionnelle

(Orbelo et al., 2005; Mitchell, 2007; Ryan, Murray & Ruffman, 2010; Mitchell & Kingston, 2011). Les données présentées dans le premier article de cette thèse sont donc les premières à démontrer qu'il en irait de même pour l'information paralinguistique vocale non émotionnelle. Par ailleurs, ces résultats indiquent que les difficultés de traitement paralinguistique vocal liées à l'âge ne seraient pas un simple artéfact découlant du déclin cognitif typiquement observé au cours du vieillissement normal. Cette observation va dans le sens de ce qui est observé pour le traitement de la prosodie affective (entre autres, Mitchell, 2007 & Mitchell & Kingston, 2011).

La concordance des résultats de la batterie EPV avec ceux précédemment rapportés ne permet toutefois pas d'exclure définitivement la contribution du déclin cognitif quant à l'apparition de difficultés de traitement paralinguistique vocal. En effet, il est possible que les outils psychométriques ou encore les variables composites sélectionnés dans ce travail et dans les études antérieures ne soient pas en mesure de jauger avec justesse les processus cognitifs précis sous-tendant le traitement paralinguistique vocal. À cet égard, une étude objective la participation significative d'un aspect de la cognition, soit l'intelligence fluide, dans les performances de reconnaissance de la prosodie vocale affective (Ruffman, Halberstadt & Murray, 2009). Néanmoins, selon ces auteurs, cette relation est essentiellement présente pour les aînés qui ne performant pas bien à la tâche. Il est donc concevable de penser que pour ces participants, des processus autres que ceux associés au vieillissement normal aient été présents, et qu'au final, ce soient ces mécanismes dégénératifs qui affecteraient significativement la performance à la tâche, et non pas les modifications cognitives typiques du vieillissement normal.

3.2.3 NATURE DES STIMULI

3.2.3.1 Comparaison du traitement vocal et non vocal

La comparaison des performances des adultes jeunes et âgés lors du traitement de stimuli vocaux et non vocaux (tâche de catégorisation de source sonore & tâche de mémorisation de voix et de cloches), met en évidence des résultats divergents. Ainsi, pour la tâche de discrimination de sources sonores, les participants âgés performant globalement moins bien que les jeunes adultes, mais de manière équivalente pour les deux types de stimuli (voix ou

instruments de musique). Ce résultat suggère que l'âge affecte de manière générale, et non spécifique les processus de discrimination auditive. Néanmoins, en ce qui concerne la tâche de mémorisation, une tendance est observée pour l'interaction âge x type de stimuli, et les performances des jeunes adultes tendent à être similaires pour les deux types de sons (voix et cloches), alors que celles des aînés tendent à être meilleures pour la mémorisation des sons de cloches que pour celle des sons vocaux.

Malgré le fait que la comparaison des profils de performances à ces deux seules tâches ne permette pas de conclure de manière irrévocable quant à l'impact différentiel du vieillissement normal sur le traitement de l'information vocale et non vocale, une hypothèse explicative peut tout de même être proposée. Il est ainsi possible que la disparité des performances entre les deux tâches puisse être expliquée par la différence entre les demandes cognitives sous-tendant les deux paradigmes comparés, une tâche de catégorisation perceptuelle demandant un traitement cognitif de plus bas niveau qu'une tâche de mémorisation. En ce sens, les différences entre les adultes jeunes et plus âgés pourraient être plus marquées pour les tâches qui requièrent une implication cognitive plus importante, ce qui a déjà été observé par le passé (entre autres, Wingfield & Tun, 2007; Stuart & Phillips, 1996; Gordon-Salant & Fitzgibbons, 1999).

Par ailleurs, alors que les jeunes adultes tendent à performer de manière similaire lors de la mémorisation de sons de voix et de cloches, les adultes âgés tendent quant à eux à être meilleurs lors de la mémorisation des sons de cloches. Ce résultat suggère que le vieillissement normal affecterait de manière préférentielle les processus sous-tendant le traitement de la voix humaine, comparativement à celui permettant le traitement de sons de l'environnement.

Ce déclin plus marqué pour le traitement de la voix observé chez les aînés pourrait provenir du fait que l'analyse des informations perceptuelles contenues dans la voix est beaucoup plus fine que celle mise en place lors du traitement de sons l'environnement. Afin d'être efficace dans la reconnaissance des voix de ses congénères, au fil de son développement, l'être humain a vraisemblablement dû automatiser une séquence de traitements élaborés. Ainsi, il doit être en mesure de traiter de manière efficace les diverses informations acoustiques

caractérisant la voix entendue, telles que sa fréquence fondamentale ou encore son timbre (Latinus & Belin, 2011). Conséquemment, pour mémoriser adéquatement les stimuli vocaux, tous les participants devaient percevoir, décoder, mais également garder une trace mnésique de l'ensemble des informations leur étant spécifiques. Ce type de traitement constitue une analyse acoustique pointue et complexe, qu'il n'est vraisemblablement pas nécessaire d'appliquer systématiquement à l'ensemble des stimuli auditifs présents dans l'environnement. Si cette hypothèse s'avère vraie, c'est ce traitement de pointe qui, au final, semble être fragilisée par le vieillissement normal.

3.2.3.1 Comparaison du traitement de stimuli vocaux naturels et modifiés

Afin de quantifier la contribution de la fo dans le traitement vocal, pour deux tâches de la batterie EPV, une condition expérimentale impliquant la présentation de morphs vocaux ayant été modifiés pour tous avoir la même fo (fo-M; correspond à la fo moyenne de l'échantillon de 64 voix masculines et féminines utilisées pour créer les morphs), a été ajoutée. Le fait d'homogénéiser ainsi les fo des stimuli réduit en quelque sorte leur spécificité masculine ou féminine.

À nouveau, la comparaison des performances des jeunes adultes et des aînés lors du traitement de stimuli vocaux naturels et modifiés (fo-M), met en évidence des résultats contradictoires (tâche de catégorisation de genre & tâche adaptative de discrimination). En ce qui concerne la tâche de catégorisation de genre, les performances des deux groupes sont similaires, et ce, pour la catégorisation de stimuli vocaux naturels et fo-M. Ni le vieillissement normal, ni le fait d'homogénéiser les fo des voix, ne semblent donc affecter les capacités de catégorisation de genre. Comme il est précédemment évoqué pour cette même tâche, l'absence de différence significative entre les deux groupes et les deux conditions expérimentales pourrait être due au manque de sensibilité du paradigme utilisé. Néanmoins, une étude comparant les performances de catégorisation de genre à l'aide d'un paradigme très similaire à celui décrit dans ce travail, n'observe pas non plus de différence, pour des jeunes adultes, entre de la catégorisation de genre effectuées sur des voix naturelles et fo-M (Pernet & Belin, 2012). Les auteurs concluent l'étude en avançant que la catégorisation de genre s'effectuerait

principalement sur la base du timbre vocal. Ils nuancent toutefois leurs propos en ajoutant que les informations fréquentielles seraient utilisées en parallèle au timbre, essentiellement pour les stimuli les plus ambigus, et donc difficiles à catégoriser. Il appert que les données obtenues ici pour les adultes âgés puissent être interprétées de la même manière.

Des conclusions différentes peuvent toutefois être tirées de l'analyse des résultats de la tâche adaptative de discrimination. Contrairement à la tâche précédente, il n'était pas demandé ici de statuer quant au genre du stimulus vocal entendu, mais bien de décider si les deux sons d'une paire étaient identiques ou non. Pour cette tâche, le fait de modifier la fo affecte le profil de performances, mais uniquement pour les adultes âgés. En ce sens, alors que les jeunes adultes présentent des seuils de discrimination équivalents pour les paires formées de voix naturelles et celles constituées de voix fo-M, les aînés obtiennent de meilleurs seuils de discrimination pour les paires fo-M (ces derniers sont cependant moins bons que ceux des jeunes adultes). Ces résultats indiquent qu'indépendamment de l'âge, la fo ne serait pas le principal indice acoustique sur lequel on se baserait pour effectuer un jugement de genre. Le fait d'obtenir des différences entre les adultes jeunes et aînés uniquement lors de la discrimination de voix naturelles met de l'avant que le fait d'homogénéiser les fo des stimuli enlève de la sensibilité à la tâche lorsque l'on souhaite distinguer les adultes jeunes et âgés.

3.2.4 SYNTHÈSE : QUE CONCLURE DES RÉSULTATS DE LA BATTETIE EPV?

Plusieurs des données obtenues lors de cette première étude sont novatrices. D'une part, les résultats suggèrent que tout en contrôlant pour le niveau cognitif général et l'acuité auditive, le vieillissement normal paraît bel et bien avoir un effet délétère sur les capacités de traitement des informations de nature vocale et ce, même si elles sont dépourvues de tout contenu linguistique ou émotionnel. Le fait de présenter un profil audiométrique compatible avec de la presbycusie permet en outre de rendre compte d'une certaine portion de ces difficultés, sans toutefois annuler l'apport du vieillissement normal. Ces deux variables semblent plutôt contribuer de manière parallèle au phénomène.

Les résultats de l'étude comportementale révèlent également que l'impact négatif du vieillissement normal sur les capacités de traitement de l'information paralinguistique vocale

s'exacerbe lorsque le niveau de demande cognitive est élevé, sans toutefois être corrélé au niveau de fonctionnement cognitif global (objectivé par une courte épreuve de dépistage).

3.3 VOLET 2 : VIEILLISSEMENT NORMAL & TRAITEMENT PARALINGUISTIQUE VOCAL – APPORTS NEUROFONCTIONNELS

Le second article de cette thèse visait à explorer l'impact du vieillissement normal sur les réseaux neuronaux sollicités lors du traitement d'informations paralinguistiques vocales. Pour ce faire, deux études ont été élaborées. La première avait comme objectif de comparer, pour des adultes jeunes et âgés, le recrutement des régions corticales spécifiquement impliquées dans le traitement de la voix : les aires vocales temporales (AVT; Article 2 – Étude 1). Les cartes d'activations cérébrales ainsi que les comparaisons intergroupes sont présentées dans les Figures 1 à 3 du second article (Chapitre II de cette thèse).

La seconde étude avait quant à elle pour objectifs d'explorer, pour les deux groupes d'âge, les réseaux neuronaux sous-tendant la réalisation d'une tâche de discrimination vocale comprenant deux niveaux de complexité, ainsi que de comparer les performances comportementales des adultes jeunes et âgés à cette même tâche (Article 2 – Étude 2). Afin de faciliter la comparaison des deux groupes, l'utilisation d'une procédure psycho-acoustique permettant aux deux groupes d'avoir un niveau de performance égal a été préconisée (voir Chapitre II – Article 2 pour un rappel méthodologique). Les patrons d'activation cérébrale ainsi que les comparaisons intergroupes effectuées sur les données comportementales et neuroradiologiques sont présentés dans les Figures 4 à 6 du second article (Chapitre II de cette thèse).

3.3.1 VIEILLISSEMENT NORMAL & SPÉCIALISATION VOCALE CÉRÉBRALE

Pour mémoire, rappelons que les AVT sont des régions corticales cérébrales qui répondent de manière préférentielle aux stimuli vocaux. Elles ont été identifiées pour la première fois grâce à l'IRMf, et sont situées le long des sections antérieures et médianes du sillon temporal supérieur (STS; entre autres, Belin et al., 2010).

Pour la tâche d'écoute passive, la comparaison des activations cérébrales spécifiquement impliquées dans le traitement de la voix ne met en évidence aucune différence entre les jeunes adultes et les aînés (contraste d'intérêt : V vs NV). Pour chacun des deux groupes, des AVT nettes et bilatérales sont ainsi identifiées, et celles recrutées chez les adultes plus âgés sont superposables à celles observées chez les adultes plus jeunes. L'étendue des AVT, mais également l'intensité de leur activation sont donc toutes deux comparables, indépendamment de l'âge. Un tel profil de résultat suggère que le recrutement des réseaux corticaux spécialisés dans le traitement de la voix, n'est pas affecté par le vieillissement normal.

Néanmoins, toujours lors de la tâche d'écoute passive, et pour le traitement des stimuli vocaux (contraste V vs NV), on observe une différence intergroupe à l'extérieur des AVT, au niveau du cortex auditif. Ainsi, comparativement aux jeunes adultes, les participants âgés présentent une activité réduite dans une portion du gyrus temporal transverse gauche (GTT Ga). L'absence de différence entre les aînés et les jeunes adultes au niveau des AVT, observée en association avec une réduction de l'activité cérébrale réduite du GTT Ga suggère que les adultes plus âgés sont en mesure de recruter adéquatement les aires spécialisées dans le traitement de la voix, mais que contrairement aux adultes plus jeunes, ils ne solliciteraient pas d'autres régions du cortex auditif. Une telle réduction, liée à l'âge, de l'activation des régions sensorielles primaires, a déjà été mise en évidence pour d'autres modalités perceptuelles, comme le traitement de formes visuelles (Cliff et al., 2012; Levine et al., 2000), de visages (Grady et al., 1994; Grady et al., 2000; Levine et al., 2000; Iidaka et al., 2002; Castelli et al., 2010), mais également lors du traitement du discours (Cliff et al., 2012; Wingfield & Grossman, 2006; Hwang et al., 2007; Wong et al., 2009). Ce phénomène est généralement interprété comme témoignant d'un échec des adultes plus âgés à recruter de façon optimale un circuit neural (pour revue, voir Reuter-Lorenz & Cappell, 2008). Ce désavantage pourrait découler de la survenue au cours du vieillissement normal, de changements cérébraux structuraux, mais pourrait également témoigner de la mise en place, par les aînés, de stratégies sous-optimales. Les effets délétères du vieillissement normal pourraient ainsi avoir contraint, chez nos participants âgés, le recrutement d'une portion du cortex auditif lors de la réalisation de la tâche d'écoute passive.

En parallèle, des différences intergroupes sont également retrouvées à l'extérieur des régions auditives (contraste V vs NV). Les adultes plus âgés recrutent ainsi des régions corticales

temporales, frontales et pariétales que les jeunes adultes ne sollicitent pas. Afin de rendre compte de tels changements neurofonctionnels accompagnant le vieillissement normal, deux phénomènes explicatifs ont été décrits : la dédifférenciation et la compensation (pour un rappel, voir la section 1.3.3.2.2. du Chapitre I; pour revue, voir Reuter-Lorenz & Park, 2010). Le profil de données observé dans l'étude pourrait-il être expliqué par l'hypothèse de la mise en place de processus de dédifférenciation? Typiquement, suite à une diminution de la capacité à engager les réseaux spécialisés, ce phénomène induit des patrons d'activation plus étendus pour les participants âgés. Pour la tâche d'écoute passive, les aînés présentent un réseau plus étendu que celui des jeunes adultes, ce qui conforte l'hypothèse de dédifférenciation. Néanmoins, pour les deux groupes d'âge, le patron d'activation des AVT est tout à fait similaire, suggérant que les réseaux spécialisés dans le traitement de la voix sont recrutés de la même manière, indépendamment de l'âge. Cet élément permet donc d'exclure la présence d'un phénomène de dédifférenciation chez les participants âgés de l'étude d'écoute passive. Le recrutement additionnel de ces régions, observé de manière concomitante au sous-recrutement d'une portion du GTT Ga, paraît ainsi plus représentatif de la mise en place de processus de nature compensatoire. Ce type de profil d'activation (réduction de l'activation d'une région corticale primaire observée en association avec le recrutement additionnel de régions corticales antérieures) a d'ailleurs déjà été observé dans plusieurs études ayant exploré l'impact de l'âge sur les processus moteurs (Heuninckx, Wenderoth & Swinnen, 2008), perceptuels (Davis et al., 2008) et mnésiques (Gutchess et al., 2005; Davis et al., 2008; Daselaar, Fleck & Cabeza, 2006). En ce qui concerne l'étude d'écoute passive présentée précédemment, des processus de compensation neurofonctionnelle semblent être présents : les régions recrutées de manière additionnelle pallieraient au sous-recrutement du GTT Ga, ce qui ultimement permettrait aux aînés de maintenir un certain niveau d'efficacité lors du traitement des stimuli vocaux.

3.3.2 DISCRIMINATION PARALINGUISTIQUE VOCALE NON AFFECTIVE : DONNÉES COMPORTEMENTALES

Il est important de rappeler d'entrée de jeu certaines caractéristiques du protocole psycho-acoustique sélectionné pour la seconde étude du second article (*transformed up-down method*; Levitt, 1971). D'une part, afin d'optimiser le potentiel de comparabilité des

performances comportementales des adultes jeunes et âgés, une procédure adaptative a été préconisée. Contrairement aux paradigmes classiques, pour lesquels la présentation des stimuli est fixe, un protocole adaptatif implique que les stimuli présentés à un essai donné dépendent à la fois de ceux ayant été précédemment présentés, mais également des performances obtenues aux essais antérieurs. D'autre part, le choix d'une procédure *up-down* implique que le changement de classe de stimuli est dépendent de la performance obtenue à au moins deux des essais précédents. Ainsi, ce n'est qu'après l'obtention d'une séquence de résultats prédéterminée que le niveau des stimuli présentés est modifié (Levitt, 1971 ; pour revue, voir Treutwein, 1995). Pour ce travail, l'utilisation d'une telle procédure a permis d'évaluer les capacités de discrimination paralinguistique vocale pour deux niveaux de performances distincts, soit 70,7% (complexité élevée) et 84,1% (complexité faible) de bonnes réponses. À titre d'exemple, en ce qui concerne la condition de faible complexité, l'écart entre les morphs constituant une paire était réduit après l'obtention de quatre bonnes réponses. Cet écart était quant à lui augmenté lorsque, pour un groupe de quatre réponses, une mauvaise réponse était présente (Levitt, 1971).

Tel qu'attendu en raison du type de paradigme psycho-acoustique sélectionné, les pourcentages de bonnes réponses des adultes jeunes et âgés sont similaires, et ce, pour les deux niveaux de complexité. Or, il en va de même pour les seuils de discrimination, contrairement à ce que l'on prévoyait considérant l'hypothèse *CRUNCH* (Compensation-Related Utilization of Neural Circuits Hypothesis ; Reuter-Lorenz & Cappell, 2008). Ainsi, pour les deux niveaux de complexité, malgré le fait que les participants âgés aient tendance à nécessiter des différences acoustiques plus grandes que celles des jeunes adultes afin de discriminer adéquatement les morphs constituant les paires, les seuils de discrimination des deux groupes ne diffèrent pas statistiquement les uns des autres.

À l'exception d'une des sous-tâches de la batterie EPV, dont les résultats sont présentés au début de ce chapitre, la présente étude est la seule à explorer l'impact du vieillissement normal sur les capacités de discrimination paralinguistique vocale non affective à l'aide d'une procédure adaptative de discrimination. Certains travaux comparent néanmoins les performances d'adultes jeunes et d'ânés lors de tâches de discrimination tonale (Moore & Peters, 1992; He, Dubno & Mills, 1998; He, Mills & Dubno, 2007), et contrairement à nos résultats,

ces études révèlent des seuils de discrimination plus faibles pour les participants âgés. Néanmoins, à l'inverse de ce qui a été effectué dans ce travail, aucune des études susmentionnées n'a pris en considération le niveau de fonctionnement cognitif de leurs participants, et aucun dépistage pour identifier la présence de déclin cognitif atypique n'a donc été effectué. Cette disparité ne paraît toutefois pas rendre compte à elle seule des divergences entre les résultats de cette thèse et ceux obtenus lors de discriminations tonales, puisque pour les adultes âgés, il ne semble pas y avoir de lien entre le déclin de l'acuité auditive (audiométrie tonale) et celui du fonctionnement cognitif général, mesuré à l'aide du MMSE, une brève épreuve de dépistage (Tay et al., 2006). Rappelons toutefois qu'en dépit de l'absence de différences statistiques significatives, les seuils de discrimination obtenus à la tâche adaptative par les aînés sont tout de même supérieurs à ceux des jeunes adultes. Ainsi, pour le faible niveau de complexité, les jeunes adultes et les aînés obtiennent respectivement des seuils de discrimination moyens, quantifiés en termes de pas de morphs (\pm sem), de 51,3 (\pm 9,1) et 69,9 (\pm 6,5). Un profil similaire est observé pour le niveau élevé de complexité, les jeunes adultes et les aînés obtenant respectivement des seuils de discrimination de 34,7 (\pm 7,0) et 49,7 (\pm 6,6). En ce sens, il est envisageable que la petite taille des deux groupes ait participé à réduire le pouvoir statistique des analyses effectuées, et que les résultats négatifs ne soient qu'un artefact de cette limite méthodologique.

Fait intéressant, alors que les adultes jeunes et âgés obtiennent des seuils de discrimination comparables pour la tâche adaptative effectuée lors de l'étude de neuroimagerie, il n'en est pas de même pour celle de la batterie EPV où, pour les stimuli vocaux naturels, les performances des aînés sont significativement inférieures à celles des jeunes adultes. Cette discordance semble pouvoir s'expliquer par le fait qu'en dépit de l'utilisation de protocoles adaptatifs similaires, l'une impliquait la discrimination de deux sons (étude de neuroimagerie) alors que l'autre nécessitait la discrimination de deux paires de sons (étude comportementale). En ce sens, les demandes inhérentes au second paradigme étaient plus élevées, ce qui au final pourrait avoir exacerbé l'écart entre les performances des adultes jeunes et âgés.

3.3.3 DISCRIMINATION PARALINGUISTIQUE VOCALE NON AFFECTIVE : PATRONS D'ACTIVITÉ CÉRÉBRALE

3.3.3.1 Mise en place de processus de plasticité cérébrale

En parallèle à l'obtention, par les deux groupes d'âge, de performances de discrimination comparables, et tout comme ce qui est observé pour l'étude d'écoute passive, les adultes âgés, lors de la tâche de discrimination vocale, recrutent des régions cérébrales additionnelles comparativement aux réseaux neuronaux des jeunes adultes. Ces régions additionnelles se situent principalement au niveau du cortex frontal et temporal.

Le fait d'observer de manière concomitante un patron de performances comportementales similaire entre les adultes jeunes et âgés ainsi qu'un recrutement neuronal additionnel chez les aînés suggère fortement la présence de mécanismes compensatoires chez ces derniers. Ainsi, le recrutement de réseaux cérébraux additionnels aurait permis aux participants âgés de performer au même niveau que les jeunes adultes à la tâche de discrimination. Les participants adultes sélectionnés pour l'étude ayant des scores de MoCA supérieurs au seuil clinique de troubles cognitifs légers (TCL), cette compensation suggère que les aînés inclus dans cette étude possèderaient un niveau élevé de réserve cognitive (pour revue, voir Stern, 2009 ou Tucker & Stern, 2011), ce qui permettrait à leur cerveau de s'adapter en étendant son réseau neuronal actif et de performer au même niveau que les jeunes adultes. Afin de confirmer la présence de processus compensatoires neurofonctionnels, il est toutefois essentiel de s'intéresser au lien existant entre la performance comportementale et les niveaux d'activation des réseaux neuronaux surnuméraires. Hypothétiquement, lors de compensation, les seuils de discrimination obtenus à la tâche adaptative par les participants âgés devraient être corrélés avec les niveaux d'activations des régions qu'ils recrutent de manière additionnelle. Concrètement parlant, plus les seuils de discrimination sont faibles (témoignant d'une bonne performance à la tâche), plus les activations des réseaux surnuméraires devraient être élevées. La présence d'une telle relation confirmerait que le recrutement des régions additionnelles a bel et bien contribué à la réalisation de la tâche cognitive. Cependant, lorsque pour la tâche de discrimination, ces relations sont investiguées statistiquement à l'aide de corrélations, aucune relation significative n'est mise en évidence, et ce, pour les trois réseaux surnuméraires objectivés chez les aînés (par souci de concision, ces résultats négatifs ne sont pas détaillés dans

l'Article 2 de cette thèse). Ainsi, même s'il semble tout à fait plausible que l'ajout de réseaux neuronaux ait permis aux aînés de maintenir un niveau de performance comparable à celui des jeunes adultes, l'absence de corrélation entre les variables, sans totalement invalider l'hypothèse compensatoire, ne la supporte pas en sa totalité. Cet aspect, qui résulte possiblement d'un artefact statistique, sera discuté plus en détail dans la section 3.5 de ce chapitre.

3.3.3.2 Niveaux de complexité

Pour la tâche de discrimination vocale, un paradigme psycho-acoustique permettant d'ajuster la présentation des stimuli en fonction des performances aux essais précédents est utilisé, assurant ainsi le contrôle du niveau de complexité de la tâche. Lorsque les cartes d'activations des deux groupes d'âge sont comparées, l'effet principal du niveau de complexité ainsi que l'interaction âge x niveaux de complexité sont tous deux non significatifs. Ces résultats suggèrent que les réseaux neuronaux sous-tendant la réalisation de la tâche de discrimination vocale sont similaires pour les deux groupes et ce, indépendamment des deux niveaux de complexité. Cela peut également indiquer que les différences quant aux réseaux neuronaux recrutés sont trop faibles pour avoir été mises en évidence.

Certaines études observent toutefois que les patrons d'activations produits par une tâche comprenant un faible et un haut niveau de complexité sont distincts pour les jeunes adultes et les aînés, ces derniers présentant un réseau d'activations plus étendu pour de faibles niveaux de complexité. Un réseau comparable entre les deux groupes serait quant à lui observé lorsque le niveau de complexité est élevé et que les performances sont adéquates (pour revue, voir Reuter-Lorenz & Park, 2010). Afin de rendre compte de cette observation, le phénomène CRUNCH a été proposé (Reuter-Lorenz & Cappell, 2008). Ce dernier présume que le cerveau âgé aurait besoin d'engager des ressources neuronales plus étendues afin de rester aussi efficace que celui des jeunes adultes et ainsi pallier les difficultés de traitement de l'information survenant avec le vieillissement. Ces activations additionnelles, qui auraient une fonction compensatoire, prendraient place pour de faibles niveaux de complexité chez les adultes âgés. Lorsque les demandes inhérentes à une tâche augmentent, une surcharge du réseau neuronal surviendrait, ce qui induirait éventuellement un traitement inadéquat de l'information ainsi qu'un

déclin de la performance. Contrairement à cette hypothèse, les données de neuroimagerie de l'étude de discrimination vocale ne mettent pas en évidence, pour les aînés, de réseaux neuronaux distincts pour les niveaux faible et élevé de complexité, tout comme elles n'objectivent pas, pour les deux niveaux de complexité, de réseau dissemblable pour les adultes jeunes et âgés. L'ensemble de ces résultats va donc à l'encontre de CRUNCH. À l'inverse des études de cette thèse, les données ayant permis d'élaborer cette hypothèse proviennent essentiellement de protocoles utilisant des tâches évaluant des fonctions cognitives de haut niveau, principalement la mémoire de travail. Le fait que nos résultats ne correspondent pas à ce que CRUNCH propose met pour la première fois en lumière la possibilité que ce modèle ne puisse être généralisé à des processus mentaux de plus bas niveau, tels que les processus de discrimination perceptuelle évalués dans cette étude.

3.3.4 SYNTHÈSE : QUE PERMETTENT DE CONCLURENT LES ÉTUDES DE NEUROIMAGERIE?

Les études de neuroimagerie rapportées dans cette thèse sont les toutes premières à explorer de manière empirique la façon dont le vieillissement normal affecte les substrats neuronaux sous-tendant les capacités de traitement paralinguistique vocal non affectif. Ces résultats pionniers indiquent de manière non équivoque que des phénomènes de plasticité cérébrale sont présents chez les adultes âgés lors du traitement de l'information vocale. Pour la tâche d'écoute passive, une réduction de l'activation d'une portion du cortex auditif est observée conjointement au recrutement additionnel de régions frontales, temporales et pariétales. Quant à la tâche de discrimination vocale, en dépit de performances comportementales comparables, les adultes âgés recrutent des régions frontales et temporales que les jeunes adultes ne sollicitent pas. Ces réaménagements neuronaux suggèrent tous deux l'installation de processus de nature compensatoire. En ce qui concerne la tâche de discrimination vocale, cette hypothèse de compensation neurofonctionnelle n'est néanmoins pas totalement confirmée, en raison de l'absence de corrélation significative entre les seuils de discrimination et l'intensité de l'activation des réseaux surnuméraires identifiés. Enfin, toujours pour la tâche de discrimination vocale et pour les deux groupes d'âge, les réseaux neuronaux induits pour les deux niveaux de complexité sont similaires. Ce résultat est interprété comme

témoignant de l'impossibilité de généraliser le phénomène CRUNCH aux processus cognitifs de plus bas niveau.

3.4 INTÉGRATION DES DONNÉES DE NEUROIMAGERIE

Comme il est mentionné précédemment, les deux expériences présentées dans le second article de cette thèse sont les toutes premières à comparer, pour des adultes jeunes et âgés, les réseaux neuronaux sous-tendant un traitement paralinguistique vocal non émotionnel. Il semble donc essentiel de considérer de manière intégrative les résultats obtenus pour la tâche d'écoute passive et celle de discrimination, afin de tenter de mieux comprendre ce qui distingue les adultes jeunes et âgés quant aux réseaux neuronaux permettant de traiter les informations vocales. Pour un rappel des résultats, se référer aux sections 3.2 et 3.3 de ce chapitre.

3.4.1 PATRONS D'ACTIVATION CÉRÉBRALE DISTINCTS POUR L'ÉCOUTE PASSIVE & LA TÂCHE ACTIVE

Les données d'imagerie obtenues lors de l'écoute passive suggèrent que le vieillissement normal est associé à une réduction des activations d'une portion du cortex temporal gauche (GTT), ainsi qu'au recrutement additionnel de régions frontales, pariétales et temporales. Des réseaux additionnels au niveau temporal et frontal sont également sollicités par les adultes âgés lors de la tâche de discrimination, mais ces régions ne correspondent pas à celles identifiées pour l'écoute passive. Un élément pouvant rendre compte de cette disparité inter-tâche quant au recrutement surnuméraire mis en place par les aînés est le niveau de demandes cognitives inhérent aux deux paradigmes. En effet, alors que la première étude requiert un faible niveau de demandes attentionnelles (tâche d'écoute passive), la seconde nécessite un apport attentionnel plus substantiel (discrimination paralinguistique vocale). Au final, les demandes cognitives sous-tendant la réalisation de la tâche de discrimination sont vraisemblablement plus importantes que celles sous-tendant la perception passive de stimuli.

Il a été montré que lors du traitement d'informations vocales, principalement lorsqu'elles sont de nature langagière, le type de tâche pouvait avoir un impact significatif sur les patrons

d'activations élicités (Binder et al., 2008). Selon cette étude, le fait d'être engagé dans une tâche active (donc cognitivement plus exigeante), serait associé au recrutement de réseaux neuronaux additionnels, typiquement impliqués dans le contrôle attentionnel et exécutif. Ce réaménagement ne serait pas présent lors d'une écoute passive. Allant en ce sens, des patrons d'activations distincts ont été observés pour l'identification d'émotions faciales effectuée à des niveaux distincts de motivation (Skelly & Decety 2012). De ce fait, les auteurs rapportent que les réseaux neuronaux sous-tendant le traitement des expressions faciales émotionnelles sont plus étendus pour la condition où les participants portent plus attention aux stimuli. En ce qui concerne les résultats présentés dans cette thèse, il est envisageable que la disparité de patrons d'activations présente entre les deux études de neuroimagerie résulte également de cet engagement différentiel dans les deux tâches. Puisque l'apport motivationnel et attentionnel nécessaire à l'exécution du protocole de discrimination vocale est supérieur à celui sous-tendant la réalisation de la tâche d'écoute passive, les réseaux neuronaux additionnels sollicités pour les deux tâches diffèrent, ces derniers étant recrutés en fonction de l'énergie à mettre pour répondre aux demandes de la tâche.

En outre, l'implication fonctionnelle des régions complémentaires sollicitées par les participants âgés dans nos deux études entérine cette hypothèse. Il est ainsi été démontré que certaines des régions corticales recrutées de manière additionnelle par les adultes âgés lors de la tâche plus active (discrimination vocale) participent également à la mise en place de processus cognitif de haut niveau. Plus spécifiquement, pour la tâche active, l'effet principal de l'âge objective le recrutement additionnel d'une portion du gyrus frontal inférieur, une région cérébrale connue pour participer à la mise en place de traitements cognitifs élaborés, tels que la prise de décision (Talati & Hirsch, 2005; Miller & Cohen, 2001). À l'inverse, pour la tâche d'écoute passive, certaines régions mises en évidence par l'effet principal de l'âge participent plutôt au traitement perceptuel d'informations émotionnelles (entre autres, Said, Haxby & Todorov, 2011). Il semble donc que les régions sollicitées en renfort par les aînés soient dépendantes de la nature du traitement cognitif effectué.

Soulignons également qu'en dépit de l'absence de chevauchement, il appert que les régions cérébrales recrutées de manière additionnelle par nos participants âgés lors des deux tâches de neuroimagerie font également partie de réseaux neuronaux prenant part au

traitement d'informations vocales ou langagières. Pour la tâche d'écoute passive, les aînés recrutent des aires au niveau du gyrus temporal supérieur, du gyrus frontal supérieur et du gyrus supramarginal. Il a déjà été démontré que ces régions participent respectivement à la reconnaissance vocale (Gainotti, 2011), au traitement émotionnel vocal (Grandjean et al., 2005; Sander et al., 2005) ainsi qu'au traitement de vocalisations (Aboitiz et Garcia, 2009). En ce qui concerne la tâche de discrimination vocale, tout comme pour l'écoute passive, une partie du gyrus temporal supérieur est recruté de manière additionnelle par les participants âgés. Une portion des gyri frontaux inférieurs et médians sont également sollicités par les aînés, régions qui participeraient respectivement au traitement de l'information linguistique ainsi qu'au décodage de la prosodie affective accompagnant le discours (Leitman et al., 2010; Sander et al., 2005). Le recrutement, par les adultes âgés, de ces régions suggère ainsi que la réorganisation cérébrale fonctionnelle survenant au cours du vieillissement normal lors du traitement de l'information vocale non affective, sans toucher les aires impliquées de manière sélective dans le traitement de la voix (les AVT), affecte tout de même des régions cérébrales sous-tendant certains processus de traitement vocaux ou langagiers.

Au final, l'ensemble de ces remaniements fonctionnels pourrait donc ultimement permettre aux adultes âgés de maintenir des performances adéquates lors du traitement d'informations vocales, et possiblement langagières.

3.4.2 RÉORGANISATION CÉRÉBRALE FONCTIONNELLE AU COURS DU VIEILLISSEMENT NORMAL : MISE EN PLACE DE STRATÉGIES DIFFÉRENTES LIÉES À L'EXPERTISE ?

Lorsque l'on considère de manière globale les résultats obtenus pour les deux études de neuroimagerie fonctionnelle présentées dans cette thèse, ils paraissent convergents. Que ce soit lors de l'écoute passive de sons vocaux ou lors de la réalisation d'une tâche de discrimination vocale, des réseaux neuronaux additionnels sont recrutés par les participants du groupe âgé. L'obtention d'un tel profil de résultats n'est pas surprenante, puisque plusieurs études ont observé le même phénomène, à tel point que des modèles explicatifs en ont été déduits, comme par exemple, HAROLD (Cabeza, 2002), PASA (Davis et al., 2008) ou CRUNCH (Reuter-Lorenz & Cappell, 2008). La question-clé ici est donc d'arriver à saisir le pourquoi de cette réorganisation

fonctionnelle. Qu'est-ce qui fait que le cerveau âgé recrute des réseaux neuronaux plus étendus afin d'accomplir une tâche ou de traiter une information? Dans la prochaine section, cette question cruciale sera discutée en fonction des données recueillies dans cette thèse.

Les résultats précédemment décrits concernant les deux études de neuroimagerie suggèrent que le recrutement de réseaux neuronaux additionnels par les adultes âgés aurait pour fonction de compenser les effets délétères de l'âge sur l'intégrité cérébrale et cognitive. Ainsi, pour l'écoute passive, le fait d'observer conjointement une réduction de l'activation d'une portion du cortex auditif et la participation supplémentaire de régions pariétale, temporale et frontale, laisse croire que ces dernières ont été impliquées pour pallier la réduction d'activation observée au niveau du cortex auditif. Concernant la tâche active, l'observation simultanée de seuils de discrimination équivalents pour les adultes jeunes et âgés et du recrutement de régions temporales et frontales surnuméraires suggère que l'implication de ces zones additionnelles a permis aux aînés de maintenir des performances comportementales au niveau de celles des jeunes adultes. La présence de processus de nature compensatoire ne peut être confirmée pour la tâche d'écoute passive, puisqu'en l'absence d'une tâche comportementale, le lien entre la performance et les activations cérébrales ne peut être quantifié. Et comme il est discuté dans la section 3.3.3.1 de ce travail, les corrélations entre les performances à la tâche de discrimination vocale et les intensités d'activations des régions sollicitées par les aînés ne sont pas significatives. D'autres arguments abondent toutefois dans le sens de l'installation, chez les participants âgés de ce travail, de mécanismes de compensation neurofonctionnelle, et il semble que les résultats des études de neuroimagerie rendent compte de l'utilisation, par les deux groupes d'âge, de stratégies de traitement de l'information vocale distinctes.

Par définition, les adultes âgés ont été exposés de manière plus extensive aux stimuli vocaux. Cette expérience prolongée pourrait donc avoir façonné la manière dont le cerveau âgé réagit à la voix et traite cette dernière. Des études antérieures ont ainsi démontré que le fait d'être exposé de manière prolongée à une classe d'objets auditifs, et donc de développer une expertise face à eux, peut affecter la façon dont les stimuli concernés sont traités (pour revue, voir Chartrand, Peretz & Belin, 2008). À titre d'exemple, le fait de consacrer de nombreuses années à pratiquer un instrument de musique modifie non seulement la manière dont le cerveau traite les sons provenant de l'instrument, mais aussi comment il traite les autres stimuli

musicaux. Les études comparant les performances de musiciens et de non-musiciens lors de traitements auditifs mettent ainsi généralement en évidence une supériorité des premiers aux différentes tâches comportementales évaluant le traitement du ton et du timbre, et ces aptitudes pourraient même se généraliser aux autres traitements auditifs (pour revue, voir Chartrand, Peretz & Belin, 2008). En ce sens, les musiciens auraient de meilleures capacités à traiter la prosodie langagière (Schön et al., 2004; Thompson, Schellenberg & Husain, 2004; Magne, Schön & Besson, 2006) ou encore à détecter les erreurs tonales dans une langue étrangère (Marques et al., 2007). Les musiciens surpasseraient par ailleurs les non-musiciens dans le traitement du timbre musical (Münzer et al., 2002) ainsi que vocal (Chartrand & Belin, 2006).

En parallèle à ces modifications comportementales, l'expertise auditive serait également associée à des phénomènes de plasticité cérébrale (pour revue, voir Levitin & Tirovolas, 2009). Entre autres, le cerveau des musiciens développerait une sensibilité particulière pour les sons provenant de l'instrument maîtrisé (Pantev et al., 2001), et une réponse électrophysiologique différente peut être observée chez des enfants une année seulement après le début des leçons de musique (Shahin et al., 2008). La présence de modifications cérébrales structurales liées au niveau de pratique a par ailleurs été quantifiée au niveau du cortex moteur primaire, du *planum temporale* et du corps calleux (Münze, Altenmüller & Jäncke, 2002). Cette généralisation de l'expertise auditive a aussi été observée chez des ornithologues, à l'aide des potentiels évoqués, et le fait de passer maître dans l'art d'identifier une espèce d'oiseau par son chant modifierait la manière dont sont traitées les informations vocales (Chartrand, Fillion-Bilodeau & Belin, 2007). Selon ces données, il semble donc que d'une part, l'expertise auditive puisse modifier la structure et le fonctionnement cérébral, et d'autre part, qu'elle puisse se généraliser à différents traitements auditifs, même s'ils ne concernent pas le stimulus d'expertise.

En ce qui concerne l'impact du vieillissement sur la généralisation de cette expertise, certaines études mettent en évidence que ses effets perdureraient dans le temps (Parbery-Clark et al., 2011; Zendel & Alain, 2012). Ainsi, les musiciens âgés performeraient mieux que les non-musiciens âgés lors du traitement de la parole dans le bruit. En outre, leurs performances sont corrélées avec les mesures comportementales de perception et de cognition auditives, ces dernières étant meilleures que chez les non musiciens (Parbery-Clark et al., 2011).

En raison de leur vécu plus long, les aînés ont forcément été en contact depuis plus longtemps que les jeunes adultes à la voix humaine. Conséquemment, ils pourraient avoir développé une plus grande expertise quant au traitement des informations qu'elle véhicule. À notre connaissance, dans le domaine du traitement vocal, il n'existe pas d'étude ayant exploré l'impact de l'exposition à une classe de stimuli sur les capacités de traitement de ces mêmes stimuli. Un tel effet a cependant été examiné pour la reconnaissance de visages, et il semble que des participants performant mieux à une tâche lorsque les visages à mémoriser appartiennent au même groupe d'âge ou encore à la même ethnie qu'eux. Ces phénomènes, respectivement nommés biais du même âge (*own-age bias*) et biais de la même-ethnie (*own-race bias*), semblent tous deux être intimement liés au fait que le plus souvent, un individu a des contacts préférentiels avec des gens appartenant à son groupe d'âge ou encore à son ethnie. Cette exposition privilégiée permettrait donc le développement d'une expertise perceptuelle quant à la reconnaissance des visages appartenant à ces catégories (pour revue, voir Rhodes & Anastasi, 2012).

Il n'est néanmoins pas clair que ces effets, mis en évidence chez les adultes jeunes, persistent au cours du vieillissement. Certaines études observent ainsi le biais du même âge chez des participants âgés normaux (Anastasi & Rhodes, 2006), alors que d'autres non (Fulton & Bartlett, 1991; Memon et al., 2003; Wilcock, Bull & Aldert, 2007). Afin de rendre compte de ces résultats contradictoires, certains auteurs proposent une hypothèse en lien avec l'intégrité des processus mnésiques (Meissner, Brigham & Butz, 2005). Il appert ainsi que l'effet facilitateur du biais du même âge serait lié au bon fonctionnement des capacités d'encodage en mémoire épisodique. Les aînés ayant généralement des capacités d'encodage inférieures à celles des jeunes adultes, cette disparité expliquerait le fait que ce biais semble moins fréquemment observé chez les aînés. Si cette proposition s'avère véridique, le biais du même âge devrait toutefois être présent chez des adultes âgés ayant des capacités d'encodage comparables à celles des jeunes adultes. Comme il est mentionné précédemment, l'existence d'un biais similaire ne semble pas avoir été explorée au niveau de la sphère vocale. L'exposition à la voix étant toute aussi substantielle que celle aux visages, il paraît toutefois vraisemblable de supposer qu'un tel effet facilitateur existerait également pour la reconnaissance vocale, et que ce biais serait aussi présent chez les adultes âgés ayant un bon fonctionnement cognitif.

Conséquemment, il est plausible que le recrutement de réseaux neuronaux distincts par les aînés et les jeunes adultes puisse être tributaire de la mise en place de processus de plasticité cérébrale associée à cette expertise. Les personnes âgées pourraient donc avoir mis en place, au fil du temps, des stratégies cérébrales de traitement de l'information vocale différentes de celles des adultes plus jeunes. En appui à cette hypothèse, les comparaisons statistiques, pour les deux groupes et pour les deux niveaux de complexité de la tâche de discrimination vocale, montrent des différences quant à la localisation du maxima d'activation cérébrale. Il est ainsi observé que pour les adultes jeunes, ces maxima se situent au niveau de l'HG, et ce pour les deux niveaux de performances. En contrepartie, pour les adultes âgés, ils se situent plutôt dans l'HD. Par ailleurs, une inversion dans les régions sollicitées pour les niveaux de complexité de la tâche est également notée. Alors que chez les jeunes adultes, les niveaux faible et élevé de complexité sont respectivement associés à des maxima d'activation au niveau temporal (gyrus temporal supérieur) et frontal (gyrus frontal inférieur), on observe le patron inverse chez les adultes âgés. Pour le faible niveau de complexité, les aînés présentent ainsi un maxima d'activation au niveau frontal (gyrus frontal inférieur) et un maxima d'activation au niveau temporal (gyrus temporal médian) pour le niveau plus élevé de complexité. En sachant que les performances comportementales entre les deux groupes ne sont pas statistiquement distinctes, ces différences au niveau des patrons d'activation suggèrent que les participants âgés utilisent une stratégie différente que les jeunes pour effectuer la tâche de manière comparable. La mise en place de ces stratégies distinctes pourrait être liée à l'installation, au fil des années, d'un phénomène d'expertise vocale chez les adultes âgés.

3.5 LIMITES & PERSPECTIVES FUTURES

Avant de conclure cette thèse, les résultats précédemment décrits et discutés doivent être nuancés, les trois études formant cette thèse présentant certaines limites.

3.5.1. LIMITES

3.5.1.1. Volet comportemental : batterie EPV

En ce qui concerne l'article comportemental présenté dans ce travail, une première limite découle du critère d'inclusion utilisé dans l'étude. Afin de maximiser le pouvoir statistique des analyses, il a été décidé que tous les participants ayant passé la batterie EPV seraient inclus dans l'étude et ce, indépendamment de leurs performances cognitives (score au MoCA) ou auditives (audiométrie tonale). Malgré le fait que ce choix ait permis d'augmenter la taille des deux groupes, il présente toutefois le désavantage d'avoir accru l'hétérogénéité de l'échantillon d'adultes âgés, ces derniers étant plus susceptibles de présenter des difficultés cognitives ou auditives. À l'avenir, afin d'atténuer cette hétérogénéité, plusieurs groupes de participants âgés pourraient être constitués, et ce, en fonction de leur niveau d'efficacité cognitive et d'acuité auditive. À titre d'exemple, quatre groupes de participants âgés pourraient être recrutés, chacun constitué : 1) de participants âgés ayant un profil d'audiométrie tonale et un score au MoCA dans les normes ; 2) de participants âgés avec un score au MoCA normal, mais présentant un profil audiométrique tonal compatible avec la presbycusie ; 3) de participants âgés avec un profil d'audiométrie tonale normal, mais ayant un score au MoCA compatible avec un trouble cognitif léger (TCL), et 4) de participants âgés avec un score au MoCA compatible avec un TCL et un profil audiométrique compatible avec la presbycusie. Un tel protocole permettrait d'explorer de manière plus directe la nature des relations unissant le fonctionnement cognitif global, l'acuité auditive, l'âge et les capacités de traitement paralinguistique vocal. Notons cependant que ce devis expérimental est nettement plus lourd que celui préconisé pour ce travail, puisque quatre groupes expérimentaux d'adultes âgés doivent être constitués au lieu d'un seul.

L'absence de condition contrôle non verbale systématique pour la batterie EPV constitue une seconde limite à l'étude comportementale effectuée pour cette thèse. Ainsi, uniquement deux des tâches comparaient les performances des adultes jeunes et âgés lors du traitement vocal et non vocal, les deux autres tâches comparant plutôt les performances des deux groupes lors du traitement de stimuli vocaux naturels et modifiés. Cet aspect de l'étude complique l'interprétation quant à l'impact du vieillissement normal sur le traitement de l'information paralinguistique vocale, puisque les comparaisons intergroupes à ce sujet ne peuvent se faire qu'entre ces deux tâches, réduisant ainsi le pouvoir de généralisation des résultats. Afin de

remédier à cette lacune, il serait intéressant de créer, pour chaque tâche de la batterie, à la fois des conditions contrôles non vocale, mais également vocale modifiée. Cela permettrait de comparer plus finement les patrons de performances comportementales lors du traitement des informations vocales et non vocales, mais également lors du traitement des informations vocales naturelles et vocales modifiées.

La troisième limite de cette étude comportementale provient du choix de certaines classes de stimuli contrôles non verbaux. Pour la tâche de discrimination de sources sonores et de mémorisation, des sons provenant d'instruments de musique et de cloches ont été utilisés comme contrôles. La voix humaine et les sons musicaux partagent toutefois plusieurs caractéristiques acoustiques. Ces rapprochements sont d'autant plus grands que les productions sont faites par des instruments isolés, tout comme la voix est produite par un instrument isolé (pour revue, voir Zatorre, Belin & Penhume, 2002). Il serait donc intéressant d'incorporer une classe supplémentaire de stimuli non vocaux, sons qui cette fois, présenteraient une structure acoustique plus distante de celle de la voix humaine, comme des bruits de pas ou encore de moteurs. Si l'hypothèse proposée s'avère fondée, les performances comportementales des adultes âgés devraient être significativement inférieures pour les stimuli vocaux que pour les stimuli non vocaux musicaux et non musicaux.

3.5.1.2 Volet neuroimagerie

Les deux études de neuroimagerie détaillées dans le second article de ce travail présentent également certaines limites méthodologiques. La première concerne le protocole pré-expérimental de préparation des participants. Avant d'être installés dans le scanner, les participants étaient informés que l'appareil produisait du bruit lors de l'acquisition des images, mais aucune séance de pratique dans un simulateur n'a été effectuée. En conséquence, lors de la tâche de discrimination, plusieurs participants ont confondu, lors des premiers essais expérimentaux, le bruit généré par le scanner avec les stimuli de la tâche, affectant ainsi négativement leurs profils de performances. Par conséquent, il a été nécessaire d'exclure plusieurs sujets des analyses, leurs performances finales se situant sous le seuil du hasard. A posteriori, il appert qu'une session de pratique en simulateur aurait vraisemblablement permis

aux participants d'être moins déstabilisés par le bruit de l'appareil lors de la tâche expérimentale, et qu'ils auraient mieux performés. Au final, cela aurait permis d'inclure un nombre plus important de participants dans les analyses, et donc d'avoir un meilleur pouvoir statistique.

La seconde limite des études de neuroimagerie présentées dans cette thèse concerne également la tâche adaptative de discrimination vocale. Les résultats obtenus indiquent que le vieillissement normal s'accompagne d'une modification des patrons d'activation cérébrale lors de la tâche. Cette disparité intergroupe ne permet toutefois pas de conclure quant à la spécificité paralinguistique vocale de ces modifications cérébrales fonctionnelles, la tâche adaptative effectuée dans le scanner ne comprenant pas de stimuli contrôles non vocaux. Afin de pallier cette faiblesse, une tâche adaptative identique pourrait être ajoutée au protocole expérimental, des tons purs remplaçant les vocalisations paralinguistiques. La comparaison pour les deux groupes d'âge et les deux types de stimuli permettrait alors d'explorer la question de la spécificité vocale des modifications neurofonctionnelles mises en évidence dans cette thèse.

3.5.2 PERSPECTIVES FUTURES

En plus des modifications techniques suggérées précédemment dans ce chapitre, il paraît essentiel que les prochains travaux qui exploreront les relations entre le vieillissement normal et le traitement paralinguistique vocal précisent la nature des difficultés observées chez les adultes plus âgés, les études présentées dans ce travail constituant seulement la seconde tentative d'exploration de cette question. Pour ce faire, elles pourraient s'intéresser à la contribution des différentes informations acoustiques contenues dans les stimuli vocaux quant aux performances. Dans un article datant de 1986, Linville et Korabic ont suggéré que les adultes âgés n'utilisent pas les informations acoustiques vocales de la même manière que les jeunes adultes afin de réaliser une tâche de catégorisation. Les aînés utiliseraient ainsi un plus large spectre d'informations acoustiques (voisement et résonance) comparativement aux jeunes adultes, qui se baseraient principalement sur les informations de voisement. Ces résultats n'ayant pas été répliqués, il semble pertinent de s'intéresser à nouveau à cette observation.

Le lien entre les difficultés de traitement de l'information paralinguistique vocale survenant avec l'âge et le fonctionnement au quotidien n'a pas encore été exploré à ce jour.

Ainsi, même si certains auteurs suggèrent que chez le jeune adulte, le fait d'avoir de bonnes capacités de traitement des informations paralinguistiques vocales serait associé à un plus grand sentiment de bien-être (Carton, Kessler & Pape, 1999), cette relation n'a jamais été évaluée chez des participants âgés. Les aînés présentant déjà plusieurs stressors environnementaux pouvant affecter leur niveau de bien-être, tels que la maladie, les difficultés financières ou encore l'isolement social (Netuveli et al., 2006), connaître la relation entre l'âge, la qualité de vie, la satisfaction relationnelle et les difficultés de traitement de l'information paralinguistiques vocales permettrait aux intervenants qualifiés d'aider les adultes âgés à minimiser ces effets délétères, en effectuant de la psychoéducation, mais également en transmettant des éventuelles stratégies compensatoires.

Afin de mieux comprendre et de préciser la nature des changements comportementaux et neurofonctionnels prenant place lors du vieillissement normal, il serait également intéressant de comparer, pour différentes populations cibles, les profils de performances et les patrons d'activation associés à la réalisation d'un traitement paralinguistique vocal. À notre connaissance, une seule étude de ce type a été effectuée, et elle comparait les performances comportementales d'adultes âgés et de patients cérébro-lésés lors du traitement comportemental de la prosodie vocale affective (Orbelo, Testa & Elliott, 2003). Comparer les profils de participants âgés sains à ceux de sujets présentant des conditions médicales connues pour être associées à des difficultés de traitement paralinguistique vocal (par ex., la schizophrénie, l'autisme ou encore certains AVC), permettrait de mieux comprendre la nature des changements touchant le traitement de l'information vocale s'installant au fil du vieillissement. Cela pourrait être effectué pour différentes facettes de l'information vocales (p. ex., vocalisations neutres ou émotionnelles; stimuli langagiers ou non...) et pourrait permettre de modéliser avec plus de précision le réseau neuronal de base impliqué dans le traitement des différents niveaux d'informations vocales, ainsi que de faire un lien avec les performances comportementales. Ultiment, des tâches comportementales sensibles pourraient être mises au point (comparable à la batterie EPV) et être utilisées par les cliniciens qualifiés afin de quantifier plus précisément la nature des difficultés de traitement de l'information vocale, d'estimer, s'il y a lieu, les atteintes fonctionnelles qui y seraient associées, et le cas échéant, d'intervenir afin d'en réduire les effets néfastes.

Une des questions que ce travail ne permet pas d'élucider avec certitude concerne le rôle fonctionnel qui sous-tendrait la réorganisation des réseaux neuronaux recrutés par les adultes âgés lors du traitement de l'information vocale. Ce point apparaît fondamental puisqu'il permettrait de statuer quant au rôle adaptatif de ce phénomène. Lorsque les profils de performances comportementales et les modifications neurofonctionnelles des participants âgés sont considérés conjointement, des processus compensatoires semblent prendre place. Néanmoins, l'absence de corrélation entre les performances comportementales et les activations du réseau surnuméraire des aînés va à l'encontre de la compensation neurofonctionnelle. Cette absence de relation statistique pourrait toutefois être un artéfact lié à la taille des groupes (14 jeunes adultes et 12 adultes âgés). En effet, si pour la neuroimagerie, des comparaisons intergroupes permettant la généralisation des résultats peuvent être faites avec un minimum de huit participants par groupe (Friston, Holmes & Worsley, 1999), la taille minimale des groupes pour des analyses comportementales de variance est plus élevée (Tabachnick & Fidel, 2007). En ce sens, la taille des deux groupes de participants est à la limite inférieure quant à la taille minimale permettant d'effectuer des statistiques paramétriques, un petit échantillon ayant plus de chance de ne pas être distribué de manière normale. Il est ainsi possible que la faible taille des échantillons ait biaisé les analyses statistiques effectuées. Refaire l'étude en incorporant plus de participants dans chacun des groupes permettrait d'explorer à nouveau la relation entre les activations cérébrales additionnelles des adultes âgés et les performances à la tâche comportementale, et ainsi d'évaluer l'hypothèse de l'installation de processus de compensation neurofonctionnelle au cours du vieillissement normal lors du traitement de l'information vocale.

3.7 CONCLUSION

L'objectif de ce travail était d'explorer l'impact du vieillissement normal sur les capacités de traitement de l'information paralinguistique vocale non affective, ainsi que de comparer, pour des adultes jeunes et âgés, les réseaux neuronaux sous-tendant ces processus. Le volet comportemental de cette thèse montre que le vieillissement normal s'accompagne d'une diminution des capacités à traiter l'information paralinguistique vocale non émotionnelle. Par ailleurs, ce déclin serait plus marqué pour les traitements cognitifs plus complexes (par ex.,

mémorisation vs catégorisation). En outre, contrairement à ce qui a été observé pour le traitement vocal affectif, la présence de presbycousie semble affecter négativement certains traitements paralinguistiques vocaux non affectifs. En contrepartie, tout comme le volet affectif, le fonctionnement cognitif ne paraît pas contribuer aux difficultés observées chez les adultes âgés.

Parallèlement, le volet de neuroimagerie met en évidence pour la toute première fois la présence d'une réorganisation des réseaux neuronaux cérébraux sous-tendant les capacités de traitement paralinguistique vocal liées à l'âge. Ce réaménagement se caractérise par le recrutement, chez les adultes âgés, de réseaux additionnels. La sollicitation de régions supplémentaires serait par ailleurs présente en concomitance avec des performances comportementales comparables entre les adultes jeunes et aînés. Ces phénomènes de plasticité ne seraient pas liés au déclin fonctionnel des régions corticales spécifiquement impliquées dans le traitement vocal, les AVT, mais pourraient plutôt témoigner de la mise en place de stratégies distinctes. L'installation de ces stratégies se ferait vraisemblablement via des processus de compensation neurofonctionnelle, possiblement lié avec l'acquisition, tout au long de la vie, d'une expertise associée à une exposition prolongée aux stimuli vocaux. Pour les deux tâches de neuroimagerie, les patrons d'activations découlant de la comparaison entre les adultes jeunes et âgés ne sont pas superposables. Cette disparité semble s'expliquer par les distinctions quant au niveau d'engagement attentionnel et motivationnel inhérent aux deux protocoles expérimentaux. En dépit du fait que les régions supplémentaires recrutées par les aînés lors des deux tâches ne soient pas identiques, elles semblent tout de même partager une certaine cohérence fonctionnelle. En effet, elles font partie des circuits impliqués dans le traitement des informations véhiculées par la voix humaine.

En somme, il apparaît que le cerveau âgé modifie sa manière de percevoir et de traiter ce stimulus tout à fait à part qu'est la voix humaine. Le défi qui devra être relevé dans l'avenir sera d'arriver à saisir les liens entre ces réorganisations cérébrales et les capacités à traiter la myriade d'informations contenues dans la voix.

CHAPITRE IV

BIBLIOGRAPHIE

- Aboitiz, F. & García, R. (2009). Merging of phonological and gestural circuits in early language evolution. *Reviews in Neurosciences*, 20(1), 71-84.
- Allen, R. & Brosgole, L. (1993). Facial and auditory affect recognition in senile geriatrics, the normal elderly and young adults. *International Journal of Neuroscience*, 68 (1-2), 33-24.
- Amaro, E. Jr. & Barker, G.J. (2006). Study design in fMRI: basic principles. *Brain and Cognition*, 60(3), 220-232.
- American Psychiatric Association. DSM-5 Task Force. Diagnostic and statistical manual of mental disorders : DSM-5. 5th ed. Arlington, VA: American Psychiatric Association; 2013.
- Anastasi, J.S. & Rhodes, M.G. (2006). Evidence for an own-age bias in face recognition. *North American Journal of Psychology*, 8(2), 237-252.
- Anstey, K.J. & Low, L.F. (2004). Normal cognitive changes in aging. *Australian Family Physician*, 33(10), 783-787.
- Beason-Held, L.L., Horwitz, B. (2002). Aging brain. *Encyclopedia of the Human Brain*, 1, 44-57.
- Belin, P., Zatorre, R.J., Lafaille, P., Ahad, P. & Pike, B. (2000). Voice-selective areas in human auditory cortex. *Nature*, 403, 309-12.
- Belin, P., Zatorre, R.J. & Ahad, P. (2002). Human temporal-lobe response to vocal sounds. *Brain Research. Cognitive Brain Research*, 13(1), 17-26.
- Belin, P., Fecteau, S. & Bédard, C. (2004). Thinking the voice: neural correlates of voice perception. *Trends in Cognitive Science*. 8(3), 129-135.

- Belin, P. (2006). Voice processing in human and non-human primates. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 361(1476), 2091-2107.
- Belin, P., Fillion-Bilodeau, S. & Gosselin, F. (2008). The Montreal Affective Voices: a validated set of nonverbal affect bursts for research on auditory affective processing. *Behavior Research Methods*, 40(2), 531-539.
- Belin, P., Bestelmeyer, P.E., Latinus, M. & Watson, R. (2011). Understanding voice perception. *British Journal of Psychology*, 102(4), 711-725.
- Bellis, T.J., Nicol, T. & Kraus, N. (2000). Aging affects hemispheric asymmetry in the neural representation of speech sounds. *The Journal of Neuroscience*, 20(2), 791-797.
- Binder, J.R., Swanson, S.J., Hammeke, T.A. & Sabsevitz, D.S. (2008). A comparison of five fMRI protocols for mapping speech comprehension systems. *Epilepsia*, 49(12), 1980-1997.
- Bozikas, V.P., Kosmidis, M.H., Anezoulaki, D., Giannakou, M., Andreou, C. & Karavatos, A. (2006). Impaired perception of affective prosody in schizophrenia. *Journal of Neuropsychiatry and Clinical Neuroscience*, 18(1), 81-85.
- Brosgole, L., Kurucz, J., Plahovinsak, T.J. & Gumiela, E. (1981). On the mechanism underlying facial-affective agnosia in senile demented patients. *International Journal of Neuroscience*, 15(4), 207-215.
- Brosgole, L., Kurucz, J., Plahovinsak, T.J., Sprotte, C. & Haveliwala, Y.A. (1983). Facial- and postural-affect recognition in senile elderly persons. *International Journal of Neuroscience*, 22(1-2), 37-45.
- Brosgole, L. & Weisman, J. (1995). Mood recognition across the ages. *International Journal of Neuroscience*, 82(3-4), 169-189.

- Brück, C., Kreifelts, B. & Wildgruber D. (2011). Emotional voices in context: a neurobiological model of multimodal affective information processing. *Physics of Life Reviews*, 8(4), 383-403.
- Cabeza, R. (2001). Cognitive neuroscience of aging: contributions of functional neuroimaging. *Scandinavian Journal of Psychology*, 42(3), 277-286.
- Cabeza, R. (2002). Hemispheric asymmetry reduction in older adults: the HAROLD model. *Psychology and Aging*, 17(1), 85-100.
- Cappell, K., Gmeindl, L., & Reuter-Lorenz, P. A. (2006). Age differences in DLPFC recruitment during verbal working memory maintenance depend on memory load. *Paper presented at the annual meeting of the Society for Neuroscience*, Atlanta, GA, November.
- Cappell, K.A., Gmeindl, L. & Reuter-Lorenz, P.A. (2010). Age differences in prefrontal recruitment during verbal working memory maintenance depend on memory load. *Cortex*, 46(4), 462-473.
- Carton, J.S., Kessler, E.A. & Pape, C.L. (1999). Nonverbal decoding skills and relationship well-being in adults. *Journal of Nonverbal Behavior*, 23(1), 91-100.
- Castelli, I., Baglio, F., Blasi, V., Alberoni, M., Falini, A., Liverta-Sempio, O., Nemni, R. & Marchetti A. (2010). Effects of aging on mindreading ability through the eyes: an fMRI study. *Neuropsychologia*, 48(9), 2586-2594.
- Chartrand, J.P. & Belin, P. (2006). Superior voice timbre processing in musicians. *Neuroscience Letters*, 405(3), 164-167.
- Chartrand, J.P., Filion-Bilodeau, S. & Belin, P. (2007). Brain response to birdsongs in bird experts. *Neuroreport*, 18(4), 335-340.

- Chartrand, J.P., Peretz, I. & Belin, P. (2008). Auditory recognition expertise and domain specificity. *Brain Research*, 1220, 191-198.
- Christensen, H., Mackinnon, A., Jorm, A.F., Henderson, A.S., Scott, L.R. & Korten, A.E. (1994). Age difference and individual variation in cognition on community-dwelling elderly. *Psychology and Aging*, 9(3), 381-390.
- Cliff, M., Joyce, D.W., Lamar, M., Dannhauser, T., Tracy, D.K. & Shergill, S.S. (2012). Aging effects on functional auditory and visual processing using fMRI with variable sensory loading. *Cortex*, 49(5), 1304-1313.
- Cohen, E.S. & Brosgole, L. (1988). Visual and auditory affect recognition in senile and normal elderly persons. *International Journal of Neuroscience*, 43(1-2):89-101.
- Conseil International de la Langue Française (2010). Dictionnaire de la psychiatrie, Paris.
- Cruikshanks, K.J., Tweed, T.S., Wiley, T.L., Klein, B.E., Klein, R., Chappell, R., Nondahl, D.M. & Dalton, D.S. (2003). The 5-year incidence and progression of hearing loss: the epidemiology of hearing loss study. *Archives of Otolaryngology – Head and Neck Surgery*, 129(10), 1041-1046.
- Daselaar, S.M., Fleck, M.S., Prince, S.E. & Cabeza, R. (2006). The medial temporal lobe distinguishes old from new independently of consciousness. *The Journal of Neuroscience*, 24;26(21), 5835-5839.
- Davis, S.W., Dennis, N.A., Daselaar, S.M., Fleck, M.S. & Cabeza, R. (2008). Que PASA? The posterior-anterior shift in aging. *Cerebral Cortex*, 18(5), 1201-1209.

- De Sanctis, P., Katz, R., Wylie, G.R., Sehatpour, J., Alexopoulos, G.S., & Foxe, J.J. (2008). Enhanced and bilateralized visual sensory processing in the ventral stream may be a feature of normal aging. *Neurobiology of Aging*, 29(10), 1576-1586.
- Dupuis, K. & Pichora-Fuller, M.K. (2010). Use of affective prosody by young and older adults. *Psychology and Aging*, 25(1), 16-29.
- Eigsti, I.M., Schuh, J., Mencl, E., Schultz, R.T. & Paul, R. (2012). The neural underpinnings of prosody in autism. *Childhood Neuropsychology*, 18(6), 600-617.
- Ellis, A. W. in *Handbook of Research on Face Processing* (eds Young, A. W. & Ellis, H. D.) 207±215 (Elsevier, Amsterdam, 1989).
- Elliott L.L., 1971. Backward and Forward Masking. *Audiol.* 10, 65-76.
- Ethofer, T., Wiethoff, S., Anders, S., Kreifelts, B., Grodd, W. & Wildgruber, D. (2007). The voices of seduction: cross-gender effects in processing of erotic prosody. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 2(4), 334-337.
- Fecteau, S., Armony, J.L., Joanette, Y. & Belin, P. (2005). Judgment of emotional nonlinguistic vocalizations: age-related differences. *Applied Neuropsychology*, 12(1), 40-48.
- Flom, R. & Bahrick, L.E. (2007). The development of infant discrimination of affect in multimodal and unimodal stimulation: The role of intersensory redundancy. *Developmental Psychology*, 43(1), 238-252.
- Friston, K.J., Holmes, A.P. & Worsley, K.J. (1999). How many subjects constitute a study? *Neuroimage*, 10(1):1-5.

- Fulton, A. & Bartlett, J.C. (1991). Young and old faces in young and old heads: the factor of age in face recognition. *Psychology and Aging*, 6(4), 623-630.
- Gainotti, G. (2011). What the study of voice recognition in normal subjects and brain-damaged patients tells us about models of familiar people recognition. *Neuropsychologia*, 49(9), 2273-2282.
- Gates, G.A. & Mills, J.H. (2005). Presbycusis. *Lancet*, 366(9491), 1111-1120.
- Glisky, E.L., Rubin, S.R. & Davidson, P.S. (2001). Source memory in older adults: an encoding or retrieval problem? *Journal of Experimental Psychology. Learning, Memory and Cognition*, 27(5), 1131-1146.
- Glisky, E.L. (2007). Changes in Cognitive Function in Human Aging. In: Riddle DR, editor. *SourceBrain Aging: Models, Methods, and Mechanisms*. Boca Raton (FL): CRC Press; 2007. Chapter 1. *Frontiers in Neuroscience*, 1-9.
- Gordon-Salant, S. & Fitzgibbons, P.J. (1999). Profile of auditory temporal processing in older listeners. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, 42(2), 300-311.
- Grady, C.L., Maisog, J.M., Horwitz, B., Ungerleider, L.G., Mentis, M.J., Salerno, J.A., Pietrini, P., Wagner, E., Haxby, J.V. (1994). Age-related changes in cortical blood flow activation during visual processing of faces and location. *The Journal of Neuroscience*, 14(3 Pt 2), 1450-1462.
- Grady, C.L., McIntosh, A.R., Horwitz, B., Maisog, J.M., Ungerleider, L.G., Mentis, M.J., Pietrini, P., Schapiro, M.B. & Haxby, J.V. (1995). Age-related reductions in human recognition memory due to impaired encoding. *Science*, 269(5221), 218-221.

- Grady, C.L., Van Meter, J.W., Maisog, J.M., Pietrini, P., Krasuski, J. & Rauschecker, J.P. (1997). Attention-related modulation of activity in primary and secondary auditory cortex. *Neuroreport*, 8(11), 2511-2516.
- Grady, C.L., McIntosh, A.R., Horwitz, B. & Rapoport, S.I. (2000). Age-related changes in the neural correlates of degraded and nondegraded face processing. *Cognitive Neuropsychology*, 17(1), 165-186.
- Grandjean, D., Sander, D., Pourtois, G., Schwartz, S., Seghier, M.L., Scherer, K.R. & Vuilleumier, P. (2005). The voices of wrath: brain responses to angry prosody in meaningless speech. *Nature Neuroscience*, 8(2):145-6.
- Green, J.A., Gustafson, G.E., Irwin, J.R., Kalinowski, L.L. & Wood, R.M. (1995). Infant crying: acoustics, perception and communication. *Early Development and Parenting*. 4(4), 161-175.
- Greenwood, P.M. (2007). Functional plasticity in cognitive aging: review and hypothesis. *Neuropsychology*, 21(6), 657-673.
- Gunning-Dixon, F.M., Gur, R.C., Perkins, A.C., Schroeder, L., Turner, T., Turetsky, B.I., Chan, R.M., Loughhead, J.W., Alsop, D.C., Maldjian, J. & Gur, R.E. (2003). Age-related differences in brain activation during emotional face processing. *Neurobiology of Aging*, 24(2), 285-295.
- Gutchess, A.H., Welsh, R.C., Hedden, T., Bangert, A., Minear, M., Liu, L.L. & Park, D.C. (2005). Aging and the neural correlates of successful picture encoding: frontal activations compensate for decreased medial-temporal activity. *Journal of Cognitive Neurosciences*, 17(1), 84-196.
- He, N., Dubno, J.R. & Mills, J.H. (1998). Frequency and intensity discrimination measured in a maximum-likelihood procedure from young and aged normal-hearing subjects. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 103(1), 553-565.

- He, N.J., Mills, J.H. & Dubno, J.R. (2007). Frequency modulation detection: effects of age, psychophysical method, and modulation waveform. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 122(1), 467-477.
- Heuninckx, S., Wenderoth, N. & Swinnen, S.P. (2008). Systems neuroplasticity in the aging brain: recruiting additional neural resources for successful motor performance in elderly persons. *The Journal of Neuroscience*, 28(1), 91-99.
- Hommet, C., Destrieux, C., Constans, T. & Berrut G. (2008). [Aging and hemispheric cerebral lateralization]. *Psychologie et Neuropsychiatrie du Vieillessement*, 6(1), 49-56.
- Huettel, S.A. (2009). Imaging techniques: BOLD Functional Magnetic Resonance Imaging. *New Encyclopedia of Neuroscience* (eds: Squire, et al.), 4, 273-281.
- Hwang, J.H., Li, C.W., Wu, C.W., Chen, J.H. & Liu, T.C. (2007). Aging effects on the activation of the auditory cortex during binaural speech listening in white noise: an fMRI study. *Audiology and Neuro-Otology*, 12(5), 285-294.
- Iidaka, T., Okada, T., Murata, T., Omori, M., Kosaka, H., Sadato, N. & Yonekura, Y. (2002). Age-related differences in the medial temporal lobe responses to emotional faces as revealed by fMRI. *Hippocampus*, 12(3), 352-362.
- Ivnik, R.J., Smith, G.E., Malec, J.F., Petersen, R.C. & Tangalos, E.G. (1995). Long-term stability and intercorrelations of cognitive abilities in older persons. *Psychological Assessment*, 7(2), 155-161.
- Kiss, I. & Ennis, T. (2001). Age-related decline in perception of prosodic affect. *Applied Neuropsychology*, 8(4), 251-254.

- Kriegstein, K.V. & Giraud, A.L. (2004). Distinct functional substrates along the right superior temporal sulcus for the processing of voices. *Neuroimage*, 22(2), 948-955.
- Krumhansl, C.L. (1990). Cognitive foundations of musical pitch. Cognitive Foundations of Musical Pitch. Oxford Psychology Series.
- Kurucz, J., Feldmar, G. & Werner, W. (1979). Prosopo-affective agnosia associated with chronic organic brain syndrome. *Journal of the American Geriatrics Society*, 27(2), 91-95.
- Kurucz, J., Charbonneau, R., Kurucz, A. & Ramsey, P. (1981). Quantitative clinicopathologic study of senile dementia. *Journal of the American Geriatrics Society*, 29(4), 158-163.
- Latinus, M. & Belin, P. (2011). Human voice perception. *Current Biology*, 21(4), 143-145.
- Lee, Y., Grady, C.L., Habak, C., Wilson, H.R. & Moscovitch, M. (2011). Face processing changes in normal aging revealed by fMRI adaptation. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(11), 3433-3447.
- Leitman, D.I., Wolf, D.H., Ragland, J.D., Laukka, P., Loughhead, J., Valdez, J.N., Javitt, D.C., Turetsky, B.I. & Gur, R.C. (2010). "It's Not What You Say, But How You Say it": A Reciprocal Temporo-frontal Network for Affective Prosody. *Frontiers in Human Neuroscience*, 4, 19.
- Levine, B.K., Beason-Held, L.L., Purpura, K.P., Aronchick, D.M., Optican, L.M., Alexander, G.E., Horwitz, B., Rapoport, S.I. & Schapiro, M.B. (2000). Age-related differences in visual perception: a PET study. *Neurobiology of Aging*, 21(4), 577-584.
- Levitt, H. (1971). Transformed up-down methods in psychoacoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 49(2), 467-477.

- Levitin, D.J. & Tirovolas, A.K. (2009). Current advances in the cognitive neuroscience of music. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1156, 211-231.
- Li, S.-C., & Lindenberger, U. (1999). Cross-level unification: A computational exploration of the link between deterioration of neurotransmitter systems and differentiation of cognitive abilities in old age. In L.-G. Nilsson & H. J. Markowitsch (Eds.), *Cognitive Neuroscience of Memory* (pp. 103–146). Seattle, WA: Hogrefe & Huber.
- Linville, S.E. & Korabic, E.W. (1986). Elderly listeners' estimates of vocal age in adult females. *Journal of the Acoustical Society of America*, 80(2), 692-694.
- Magne, C., Schön, D. & Besson, M. (2006). Musician children detect pitch violations in both music and language better than nonmusician children: behavioral and electrophysiological approaches. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18(2), 199-211.
- Marques, C., Moreno, S., Castro, S.L. & Besson, M. (2007). Musicians detect pitch violation in a foreign language better than nonmusicians: behavioral and electrophysiological evidence. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 19(9), 1453-1463.
- Mattay, V.S., Fera, F., Tessitore, A., Hariri, A.R., Berman, K.F., Das, S., Meyer-Lindenberg, A., Goldberg, T.E., Callicott, J.H. & Weinberger, D.R. (2006). Neurophysiological correlates of age-related changes in working memory capacity. *Neuroscience Letters*, 392(1-2), 32-37.
- Mehrabian, A. (1967). Orientation behaviors and nonverbal attitude communication. *The Journal of Communication*, 4, 324-332.
- Meissner, C.A., Brigham, J.C. & Butz, D.A. (2005). Memory for own-race faces: a dual-process approach. *Applied Cognitive Psychology*, 19, 545-567.

- Memon, A., Bartlett, J., Rose, R. & Gray, C. (2005). The aging eyewitness: effects of age on face, delay, and source-memory ability. *Journals of Gerontology B Psychological Sciences and Social Sciences*, 58(6), 338-345.
- Millar, W.J. (2005). Problèmes d'audition chez les personnes âgées. *Rapports sur la Santé*, 16 (4), 53-56.
- Miller, E.K. & Cohen, J.D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual Review of Neuroscience*, 24, 167-202.
- Mitchell, R.L.C. (2007). Age-related decline in the ability to decode emotional prosody: primary or secondary phenomenon? *Cognition and Emotion*, 21:7, 1435-1454.
- Mitchell, R.L.C. & Kingston, R.A. (2011). Is age-related decline in vocal emotion identification an artifact of labeling cognitions? *International Journal of Psychological Studies*, 3 (2), 156-163.
- Moore, B.C. & Peters, R.W. (1992). Pitch discrimination and phase sensitivity in young and elderly subjects and its relationship to frequency selectivity. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 91(5), 2881-893.
- Morse, C.K. (1993). Does variability increase with age? An archival study of cognitive measures. *Psychology of Aging*, 8(2), 156-164.
- Münste, T.F., Altenmüller, E. & Jäncke, L. (2002). The musician's brain as a model of neuroplasticity. *Nature Reviews. Neuroscience*, 3(6), 473-478.
- Münzer, S., Bertt, S. & Pechmann, T. (2002). Encoding of timber, speech and tones: musicians vs. non-musicians. *Psychologische Beiträge*, 44(2), 187-202.

- Naccarato, M., Calautti, C., Jones, P.S., Day, D.J., Carpenter, T.A. & Baron, J.C. (2006). Does healthy aging affect the hemispheric activation balance during paced index-to-thumb opposition task? An fMRI study. *Neuroimage*, 32(3), 1250-1256.
- Netuveli, G., Wiggins, R.D., Hildon, Z., Montgomery, S.M. & Blane, D. (2006). Quality of life at older ages: evidence from the English longitudinal study of aging (wave 1). *Journal of Epidemiology and Community Health*, 60(4), 357-363.
- Orbelo, D.M., Testa, J.A. & Ross, E.D. (2003). Age-related impairments in comprehending affective prosody with comparison to brain-damaged subjects. *Journal of Geriatric Psychiatry and Neurology*, 16(1), 44-52.
- Orbelo, D.M., Grim, M.A., Talbott, R.E. & Ross E.D. (2005). Impaired comprehension of affective prosody in elderly subjects is not predicted by age-related hearing loss or age-related cognitive decline. *Journal of Geriatric Psychiatry and Neurology*, 18(1), 25-32.
- Oscar-Berman, M., Hancock, M., Mildworf, B., Hutner, N. & Weber, D.A. (1990). Emotional perception and memory in alcoholism and aging. *Alcoholism, Clinical and Experimental Research*, 14(3), 383-393.
- Pantev, C., Engelien, A., Candia, V. & Elbert, T. (2001). Representational cortex in musicians. Plastic alterations in response to musical practice. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 930, 300-314.
- Parbery-Clark, A., Strait, D.L., Anderson, S., Hittner, E. & Kraus, N. (2011). Musical experience and the aging auditory system: implications for cognitive abilities and hearing speech in noise. *PLoS One*, 6(5), e18082.
- Patterson, R.D. & Johnsrude, I.S. (2008). Functional imaging of the auditory processing applied to speech sounds. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 363(1493), 1023-1035.

- Paulmann, S., Pell, M.D. & Kotz, S.A. (2008). How aging affects the recognition of emotional speech. *Brain and Language*, 104(3), 262-269.
- Pell, M.D. & Baum, S.R. (1997). The ability to perceive and comprehend intonation in linguistic and affective contexts by brain-damaged adults. *Brain and Language*, 57(1), 80-99.
- Pernet, C.R. & Belin, P. (2012). The role of pitch and timbre in voice gender categorization. *Frontiers in Psychology*. 3, 23.
- Raithel, V. & Hielscher-Fastabend, M. (2004). Emotional and linguistic perception of prosody. Reception of prosody. *Folia Phoniatica et Logopaedica*, 56(1), 7-13.
- Reuter-Lorenz, P.A. & Cappell, K.A. (2008). Neurocognitive aging and the compensation hypothesis. *Current Directions in Psychological Science*, 17(3), 177-182.
- Reuter-Lorenz, P.A. & Park, D.C. (2010). Human neuroscience and the aging mind: a new look at old problems. *Journals of Gerontology B Psychological Sciences and Social Sciences*, 65(4), 405-415.
- Rhodes, M.G. & Anastasi, J.S. (2012). The own-age bias in face recognition: a meta-analytic and theoretical review. *Psychological Bulletin*, 138(1), 146-174.
- Ries, P.W. (1994). Prevalence and characteristics of persons with hearing trouble: United States, 1990-91. *Vital and Health Statistics. Series 10, Data from the National Health Survey*, 188, 1-75.
- Ruffman, T., Halberstadt, J. & Murray, J. (2009). Recognition of facial, auditory, and bodily emotions in older adults. *Journals of Gerontology B Psychological Sciences and Social Sciences*, 64(6), 696-703.

- Ruffman, T., Sullivan, S. & Dittrich, W. (2009). Older adults' recognition of bodily and auditory expressions of emotion. *Psychology and Aging*, 24(3), 614-622.
- Ryan, M., Murray J. & Ruffman, T. (2010). Aging and the perception of emotion: processing vocal expressions alone and with faces. *Experimental Aging Research*, 36(1), 1-22.
- Sander, D., Grandjean, D., Pourtois, G., Schwartz, S., Seghier, M.L., Scherer, K.R. & Vuilleumier P. (2005). Emotion and attention interactions in social cognition: brain regions involved in processing anger prosody. *Neuroimage*, 28(4), 848-858.
- Said, C.P., Haxby, J.V. & Todorov, A. (2011). Brain systems for assessing the affective value of faces. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 366(1571), 1660-1670.
- Schneider, B.A., Daneman, M. & Pichora-Fuller, M.K. (2002). Listening in aging adults: from discourse comprehension to psychoacoustics. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 56(3), 139-152.
- Schon, D., Lorber, B., Spacal, M. & Semenza, C. (2004). A selective deficit in the production of exact musical intervals following right-hemisphere damage. *Cognitive Neuropsychology*, 21(7), 773-784.
- Shahin, A.J., Roberts, L.E., Chau, W., Trainor, L.J. & Miller, L.M. (2008). Music training leads to the development of timbre-specific gamma band activity. *Neuroimage*, 41(1), 113-122.
- Skelly, L.R. & Decety, J. (2012). Passive and motivated perception of emotional faces: qualitative and quantitative changes in the face processing network. *PLoS One*, 7(6).
- Stern, Y. (2009). Cognitive reserve. *Neuropsychologia*, 47(10), 2015-2028.

- Stuart, A. & Phillips, D.P. (1996). Word recognition in continuous and interrupted broadband noise by young normal-hearing, older normal-hearing, and presbycusis listeners. *Ear and Hearing*, 17(6), 478-489.
- Sullivan, S. & Ruffman, T. (2004). Emotion recognition deficits in the elderly. *The International Journal of Neuroscience*, 114(3), 403-432.
- Tabachnick, B.G. & Fidell, L.S. (2007). Using multivariate statistics. Ed. Boston Pearson.
- Talati, A. & Hirsch, J. (2005). Functional specialization within the medial frontal gyrus for perceptual go/no-go decisions based on "what," "when," and "where" related information: an fMRI study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 17(7), 981-993.
- Tay, T., Kifley, A., Lindley, R., Landau, P., Ingham, N., Mitchell, P. & Wang, J.J. (2006). Are sensory and cognitive declines associated in older persons seeking aged care services? Findings from a pilot study. *Annals of the Academy of Medicine, Singapore*, 35(4), 254-259.
- Thompson, W.F., Schellenberg, E.G. & Husain, G. (2004). Decoding speech prosody: do music lessons help? *Emotion*, 4(1), 46-64.
- Treutwein, B. (1995). Adaptive psychophysical procedures. *Vision Research*, 35(17), 2503-2522.
- Tucker, A.M. & Stern, Y. (2011). Cognitive reserve in aging. *Current Alzheimer Research*, 8(4), 354-360.
- Tun, P.A., Williams, V.A., Small, B.J. & Hafter, E.R. (2012). The effects of aging on auditory processing and cognition. *American Journal of Audiology*, 21(2), 344-350.

- von Kriegstein, K., Kleinschmidt, A., Sterzer, P. & Giraud, A.L. (2005). Interaction of face and voice areas during speaker recognition. *Journal Cognitive Neuroscience*, 17(3), 367-376.
- Warren, J.D., Scott, S.K., Price, C.J. & Griffiths, T.D. (2006). Human brain mechanisms for the early analysis of voices. *Neuroimage*, 31(3), 1389-1397.
- Weissman, D.H., Banich, M.T., & Puente, E.I. (2000). An unbalanced distribution of inputs facilitates interhemispheric interaction. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 6, 313-321.
- Wilcock, R.A., Bull, R & Aldert, V. (2007). Are old witnesses always poorer witnesses? Identification accuracy, context reinstatement, own-age bias. *Psychology, Crime and Law*, 13(3), 305-316.
- Wingfield, A. & Grossman, M. (2006). Language and the aging brain: patterns of neural compensation revealed by functional brain imaging. *Journal of Neurophysiology*, 96(6), 2830-2839.
- Wingfield, A. & Tun, P.A. (2007). Cognitive supports and cognitive constraints on comprehension of spoken language. *Journal of the American Academy of Audiology*, 18(7), 548-558.
- Wong, B., Cronin-Golomb, A. & Nearing, S. (2005). Patterns of visual scanning as predictors of emotion identification in normal aging. *Neuropsychology*, 19(6), 739-749.
- Wong, P.C., Jin, J.X., Gunasekera, G.M., Abel, R., Lee, E.R. & Dhar, S. (2009). Aging and cortical mechanisms of speech perception in noise. *Neuropsychologia*, 47(3), 693-703.
- Ylikoski, R., Ylikoski, A., Keskivaara, P., Tilvis, R., Sulkava, R. & Erkinjuntti, T. (1999). Heterogeneity of cognitive profiles in aging: successful aging, normal aging, and individuals at risk for cognitive decline. *European Journal of Neurology*, 6(6), 645-652.

Zatorre, R.J., Belin, P. & Penhune, V.B. (2002). Structure and function of auditory cortex: music and speech. *Trends in Cognitive Sciences*, 6(1), 37-346.

Zurek, P.M. & Formby, C. (1981). Frequency-discrimination ability of hearing-impaired listeners. *Journal of Speech and Hearing Research*, 24(1), 108-112.

Zendel, B.R. & Alain, C. (2012). Musicians experience less age-related decline in central auditory processing. *Psychology and Aging*, 27(2), 410-417.

CHAPITRE V

ANNEXES

ANNEXE I**BATTERIE D'ÉVALUATION DE LA PERCEPTION VOCALE (EVP)**Questionnaire téléphonique de présélection

Lors de la conversation téléphonique initiale, le verbatim suivant a été mentionné au participant potentiel :

« Pour savoir si vous êtes éligible à la présente étude, je vais vous poser quelques questions. Les informations que vous me fournirez demeureront absolument confidentielles, que vous participiez à l'étude ou non. Les informations recueillies lors de votre participation à l'étude demeureront elles aussi confidentielles, tel que ce sera mentionné dans le formulaire de consentement que vous devrez lire et signer le jour de votre participation à l'étude. Les questions que je vous pose par téléphone visent à vous éviter de vous déplacer pour rien, s'il advenait que vous ne répondiez pas aux critères de sélection. »

Par la suite, les questions suivantes ont été posées :

1. Quel âge avez-vous?
2. Quel est votre niveau de scolarité?
3. Êtes-vous musicien (ne)? Quelle est votre expérience musicale?
4. Quelle est votre latéralité manuelle subjective?
5. Quelle est votre langue maternelle?
6. Avez-vous déjà subi un accident vasculaire cérébral?
7. Avez-vous déjà subi un traumatisme crânien, avec ou sans perte de conscience?
8. Avez-vous été anesthésié dans les 6 derniers mois?
9. À quelle fréquence et en quelle quantité consommez-vous de l'alcool? Des drogues?
10. Prenez-vous des médicaments? Si oui, lesquels?
11. Considérez-vous avoir une bonne audition? (Portez-vous un appareil auditif?)
12. Êtes-vous en mesure d'utiliser vos membres supérieurs?

ANNEXE II

BATTERIE D'ÉVALUATION DE LA PERCEPTION VOCALE (EVP)

Phase d'expérimentation – Consignes écrites

- Lors de chacune des tâches, vous devrez d'abord lire la feuille de consignes.
- Assurez-vous d'avoir bien compris la tâche à effectuer et n'hésitez pas à poser des questions s'il y a lieu.
- L'examineur fera apparaître une fenêtre blanche devant vous.
- Lorsque vous êtes prêt(e) à débiter la tâche, cliquez sur l'écran avec la souris.
- Pour chacune des tâches, **vous devez fournir une réponse** après avoir entendu **chaque** séquence. Il est possible que quelques fois, vous soyez moins certain(e) de votre réponse. Allez-y alors selon votre bon jugement.
- Répondez toujours du mieux que vous pouvez, le plus rapidement possible.
- Avant chaque tâche, nous vous suggérons de placer vos mains sur le clavier aux endroits indiqués pour répondre, et de fermer les yeux pour mieux vous concentrer sur les voix que vous entendrez.

Phase d'expérimentation – Séquence de passation

TÂCHE NO 1 : TÂCHE DE MÉMORISATION VOIX-CLOCHES – PHASE D'ACQUISITION

Consignes

Partie 1 : Mémorisation des sons

Vous entendrez 8 séquences de sons. Chaque séquence sera composée d'un même son, répété à 3 reprises (3 x 8 sons). Nous vous demandons d'être attentif : vous devrez porter attention aux sons dans le but de les apprendre, car par la suite, vous devrez être en mesure de dire si oui ou non, vous les avez déjà entendus auparavant. Il y aura une séance de rappel immédiat (partie 2), puis une séance de rappel différé (partie 3).

Partie 2 : Rappel immédiat

Vous entendrez un son. Vous devrez dire s'il s'agit d'un son que vous avez **mémorisé auparavant**, ou s'il s'agit d'un son **nouveau** pour vous.

S'il s'agit d'un son 'ancien', c'est-à-dire que vous avez déjà mémorisé auparavant, appuyez sur « old » : à gauche du clavier. S'il s'agit d'un son 'nouveau', c'est-à-dire que vous n'avez **jamais entendu auparavant**, appuyez sur « new » : à droite du clavier.

La première fois, il s'agira de sons de voix. Ensuite, il s'agira de sons de cloches.

La durée totale de cette partie du test est d'environ 5 minutes.

Attention : il n'y aura pas de séance d'essai pour cette tâche.

Avez-vous des questions?

TÂCHE NO 2 : QUESTIONNAIRES PAPIERS

Consignes

L'expérimentateur vous remettra 2 questionnaires à remplir à la main. Portez attention aux questions et répondez le plus honnêtement possible (*le questionnaire présenté en Annexe II a été*

remis aux participants, ainsi que le Beck Depression Inventory pour les jeunes adultes et le Geriatric Depression Scale pour les aînés).

TÂCHE NO 3 : TÂCHE DE MÉMORISATION VOIX-CLOCHES – PHASE DE RAPPEL IMMÉDIAT

Consignes

Au début de la séance, nous vous avons demandé de prêter attention à des sons afin de les mémoriser. Chacun de ces sons a été présenté 3 fois. Il y avait des sons de voix et des sons de cloches.

Dans cette partie du test, vous entendrez des sons, un à la fois. Vous devrez dire s'il s'agit d'un son que vous avez mémorisé auparavant, ou s'il s'agit d'un son nouveau pour vous.

S'il s'agit d'un son 'ancien', c'est-à-dire que vous avez déjà mémorisé, appuyez sur « old », à gauche du clavier. S'il s'agit d'un son nouveau, appuyez sur « new », à droite du clavier.

Pour cette tâche, l'examineur vous présentera 2 séries de sons. Lors de la première série, il s'agira de sons de voix et lors de la deuxième série, il s'agira de sons de cloches.

La durée totale de cette partie du test est d'environ 5 minutes.

TÂCHE NO 4 : TÂCHE ADAPTATIVE DE DISCRIMINATION

Consigne

Pour la tâche "Adaptation", vous entendrez des séquences de 4 sons groupés en 2 paires. Ainsi, une séquence = 2 x 2 sons.

L'une des paires que vous entendrez sera constituée de **sons identiques** tandis que l'autre paire sera constituée de **sons différents**.

Par exemple : A – A – B – A (ici, la deuxième paire serait constituée de sons différents)

Vous devez identifier laquelle des 2 paires est constituée de sons différents.

S'il s'agit de la première paire, appuyez sur 1 : à gauche du clavier.

S'il s'agit de la deuxième paire, appuyez sur 2 : à droite du clavier.

Il y aura une séance d'essai pour cette tâche.

Ensuite, l'examineur vous présentera 2 séries de sons.

Certaines séries pourront vous paraître plus difficiles que d'autres.

Dans chacune des séries, l'idée est la même : il y a 1 son parmi les 4 qui est différent des autres. Il faut dire si ce son appartient à la première ou à la deuxième paire qui a été présentée.

La durée de chaque série est de 5 à 8 minutes.

TÂCHE NO 5 : TÂCHE DE DISCRIMINATION DE SOURCES SONORES

Consignes

Pour cette tâche de discrimination, vous entendrez des paires de sons. Il y aura 2 séries : la première série sera composée de voix, la deuxième de sons de divers instruments.

Concernant les voix, il s'agit de dire si c'est **la même personne** qui a prononcé les sons dans les 2 cas.

La personne qui s'exprime **ne fera pas le même son 2 fois** ; il s'agit de porter attention à la **voix**. Posez-vous la question suivante : « Est-ce qu'une seule personne s'est exprimée (même source) ou 2 personnes différentes (sources différentes)? »

C'est le même principe pour les instruments. Il faut dire si c'est **exactement le même instrument** qui a produit les 2 sons. Encore une fois, les 2 sons présentés représenteront 2 notes différentes : c'est normal. Il faut dire si c'est le même **instrument** qui est entendu, les 2 fois. Par exemple, il peut y avoir un son joué par une guitare classique, puis un autre son joué par une guitare sèche... Alors, il s'agirait de 2 sources *différentes*.

Si les 2 sons viennent d'une même source, il faut appuyer sur « = », à gauche du clavier.

Si les 2 sons viennent de sources différentes, il faut appuyer sur « ≠ », à droite du clavier.

Pour cette tâche, l'examineur vous présentera 2 séries de sons.

La durée de chaque série est de 2 à 4 minutes.

TÂCHE NO 6 : TÂCHE DE CATÉGORISATION DE GENRE

Consigne

Pour la tâche "Catégorisation", vous entendrez 1 son synthétique.

Il s'agit de dire si selon vous, ce son s'apparente à celui d'une voix d'homme ou de femme.

S'il s'agit d'une voix d'homme, appuyez sur « homme », à gauche du clavier.

S'il s'agit d'une voix de femme, appuyez sur « femme », à droite du clavier.

Il y aura une séance d'essai pour cette tâche.

L'examineur vous présentera 2 séries de sons.

La durée de chaque série est de 2 à 4 minutes.

ANNEXE III**BATTERIE D'ÉVALUATION DE LA PERCEPTION VOCALE (EVP)**

Phase d'expérimentation — Questionnaire papier

<u>I. Informations personnelles</u>	
1. NOM, Prénom _____	
2. Sexe	
Homme	<input type="checkbox"/>
Femme	<input type="checkbox"/>
3. Date de naissance _____	
4. Âge _____	
5. Scolarité	
Quel est le dernier diplôme que vous ayez obtenu? _____	
Quel est votre métier actuel? _____	
6. Latéralité manuelle subjective	
Droitier	<input type="checkbox"/>
Gaucher	<input type="checkbox"/>
7. Expertise musicale	
Avez-vous déjà joué d'un instrument?	
Oui	<input type="checkbox"/>
Non	<input type="checkbox"/>
Si Oui, lequel: _____	
Si Oui, durant combien de temps: _____	
Avez-vous déjà pris des cours de chant ou de solfège?	
Oui	<input type="checkbox"/>
Non	<input type="checkbox"/>
Si Oui, durant combien de temps: _____	

8. Activités de loisirs

Nommez les activités que vous aimez pratiquer durant vos temps libres (en ordre de pratique):

1. _____ 3. _____
 2. _____ 4. _____

I. Informations personnelles (suite)**9. Exercice physique**

Pratiquez-vous régulièrement une ou plusieurs activités physiques?

- Oui
 Non

Si Oui, laquelle ou lesquelles?

<u>Type d'activité physique</u>	<u>Fréquence (par semaine)</u>
_____	_____
_____	_____
_____	_____

10. Plaintes subjectives

Ressentez-vous certaines difficultés (physiques ou cognitives) qui vous incommode dans votre vie quotidienne?

- Oui
 Non

Si Oui, lesquelles:

II. Informations médicales

1. Souffrez-vous ou avez-vous souffert d'un ou de plusieurs de ces troubles de santé?

PbIs moteurs (ex. difficulté à marcher, à bouger les membres)	Oui <input type="checkbox"/>	Non <input type="checkbox"/>
PbIs articulaires (ex. arthrite, arthrose)	Oui <input type="checkbox"/>	Non <input type="checkbox"/>
PbIs respiratoires (ex. asthme, emphysème)	Oui <input type="checkbox"/>	Non <input type="checkbox"/>
PbIs cardiaques (ex. infarctus, pontage)	Oui <input type="checkbox"/>	Non <input type="checkbox"/>
PbIs neurologiques (ex. attaques cérébrales)	Oui <input type="checkbox"/>	Non <input type="checkbox"/>
PbIs psychiatriques (ex. dépression, schizophrénie)	Oui <input type="checkbox"/>	Non <input type="checkbox"/>
PbIs sensoriels (ex. surdité, cataracte)	Oui <input type="checkbox"/>	Non <input type="checkbox"/>
PbIs dermatologiques (ex. psoriasis, eczéma)	Oui <input type="checkbox"/>	Non <input type="checkbox"/>

Autres: _____

Si vous prenez une médication, inscrire le nom des médicaments:

2. Considérez-vous avoir une bonne audition?

Oui
Non

3. Actuellement, souffrez-vous de dépression?

Oui
Non

4. Êtes-vous claustrophobe?

Oui
Non

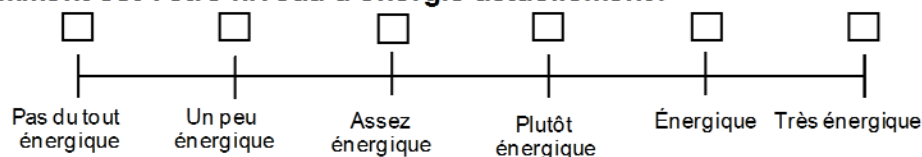
5. Avez-vous des difficultés à dormir?

Oui
Non

Si oui:

Difficultés d'endormissement	Oui <input type="checkbox"/>	Non <input type="checkbox"/>
Réveils précoces et incapacité à se rendormir	Oui <input type="checkbox"/>	Non <input type="checkbox"/>
Sommeil insatisfaisant	Oui <input type="checkbox"/>	Non <input type="checkbox"/>

6. Comment est votre niveau d'énergie actuellement?



7. Comment est votre consommation d'alcool et de drogues?

	Alcool	Drogues
Très fréquente (plusieurs fois par jour)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fréquente (plusieurs fois pas semaine)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Occasionnelle (une fois par semaine ou moins)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Rare (une fois par mois ou moins)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Jamais	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Si s'applique, type de drogues consommée: _____

ANNEXE IV

BATTERIE D'ÉVALUATION DE LA PERCEPTION VOCALE (EVP)

Phase d'expérimentation — Inventaire de dépression de Beck-II-Abrégé

(Traduction française : P. Pichot)

Nom : Prénom : Date :

Sexe : Âge :

Instructions :

Ce questionnaire comporte plusieurs séries de quatre propositions. Pour chaque série, lisez les quatre propositions, puis choisissez celle qui décrit le mieux votre état actuel.

Entourez le numéro qui correspond à la proposition choisie. Si, dans une série, plusieurs propositions vous paraissent convenir, entourez les numéros correspondants.

A

0 Je ne me sens pas triste

1 Je me sens cafardeux ou triste

2 Je me sens tout le temps cafardeux ou triste et je n'arrive pas à en sortir

3 Je suis si triste et si malheureux que je ne peux pas le supporter

B

0 Je ne suis pas particulièrement découragé ni pessimiste au sujet de l'avenir

1 J'ai un sentiment de découragement au sujet de l'avenir

2 Pour mon avenir, je n'ai aucun motif d'espérer

3 Je sens qu'il n'y a aucun espoir pour mon avenir et que la situation ne peut s'améliorer

C

- 0 Je n'ai aucun sentiment d'échec de ma vie
- 1 J'ai l'impression que j'ai échoué dans ma vie plus que la plupart des gens
- 2 Quand je regarde ma vie passée, tout ce que j'y découvre n'est qu'échec
- 3 J'ai un sentiment d'échec complet dans toute ma vie personnelle (dans mes relations avec mes parents, mon mari, ma femme, mes enfants)

D

- 0 Je ne me sens pas particulièrement insatisfait
- 1 Je ne sais pas profiter agréablement des circonstances
- 2 Je ne tire plus aucune satisfaction de quoi que ce soit
- 3 Je suis mécontent de tout

E

- 0 Je ne me sens pas coupable
- 1 Je me sens mauvais ou indigne une bonne partie du temps
- 2 Je me sens coupable
- 3 Je me juge très mauvais et j'ai l'impression que je ne vauds rien

F

- 0 Je ne suis pas déçu par moi-même
- 1 Je suis déçu par moi-même
- 2 Je me dégoûte moi-même
- 3 Je me hais

G

- 0 Je ne pense pas à me faire du mal
- 1 Je pense que la mort me libérerait
- 2 J'ai des plans précis pour me suicider
- 3 Si je le pouvais, je me tuerais

H

- 0 Je n'ai pas perdu l'intérêt pour les autres gens
- 1 Maintenant, je m'intéresse moins aux autres gens qu'autrefois
- 2 J'ai perdu tout l'intérêt que je portais aux autres gens et j'ai peu de sentiments pour eux
- 3 J'ai perdu tout intérêt pour les autres et ils m'indiffèrent totalement

I

- 0 Je suis capable de me décider aussi facilement que de coutume
- 1 J'essaie de ne pas avoir à prendre de décision
- 2 J'ai de grandes difficultés à prendre des décisions
- 3 Je ne suis plus capable de prendre la moindre décision

J

- 0 Je n'ai pas le sentiment d'être plus laid qu'avant
- 1 J'ai peur de paraître vieux ou disgracieux
- 2 J'ai l'impression qu'il y a un changement permanent dans mon apparence physique qui me fait paraître disgracieux
- 3 J'ai l'impression d'être laid et repoussant

K

- 0 Je travaille aussi facilement qu'auparavant
- 1 Il me faut faire un effort supplémentaire pour commencer à faire quelque chose
- 2 Il faut que je fasse un très grand effort pour faire quoi que ce soit
- 3 Je suis incapable de faire le moindre travail

L

- 0 Je ne suis pas plus fatigué que d'habitude
- 1 Je suis fatigué plus facilement que d'habitude
- 2 Faire quoi que ce soit me fatigue
- 3 Je suis incapable de faire le moindre travail

M

- 0 Mon appétit est toujours aussi bon
- 1 Mon appétit n'est pas aussi bon que d'habitude
- 2 Mon appétit est beaucoup moins bon maintenant
- 3 Je n'ai plus du tout d'appétit

ANNEXE V**BATTERIE D'ÉVALUATION DE LA PERCEPTION VOCALE (EVP)**Phase d'expérimentation — Échelle de dépression Gériatrique

- | | |
|--|---------|
| 1. Êtes-vous satisfait(e) de votre vie? | Oui Non |
| 2. Avez-vous renoncé à un grand nombre de vos activités? | Oui Non |
| 3. Avez-vous l'impression que votre vie est vide? | Oui Non |
| 4. Vous ennuyez-vous souvent? | Oui Non |
| 5. Envisagez-vous l'avenir avec optimisme? | Oui Non |
| 6. Êtes-vous souvent préoccupé(e) par des pensées qui reviennent sans cesse? | Oui Non |
| 7. Êtes-vous de bonne humeur la plupart du temps? | Oui Non |
| 8. Craignez-vous un mauvais présage pour l'avenir? | Oui Non |
| 9. Êtes-vous heureux (se) la plupart du temps | Oui Non |
| 10. Avez-vous souvent besoin d'aide? | Oui Non |
| 11. Vous sentez-vous souvent nerveux (se) au point de ne pouvoir tenir en place? | Oui Non |
| 12. Préférez-vous rester seul(e) dans votre chambre plutôt que d'en sortir | Oui Non |
| 13. L'avenir vous inquiète-t-il? | Oui Non |
| 14. Pensez-vous que votre mémoire est plus mauvaise que celle de la plupart
des gens? | Oui Non |
| 15. Pensez-vous qu'il est merveilleux de vivre à notre époque? | Oui Non |
| 16. Avez-vous souvent le cafard? | Oui Non |
| 17. Avez-vous le sentiment d'être désormais inutile? | Oui Non |
| 18. Ressassez-vous beaucoup le passé? | Oui Non |
| 19. Trouvez-vous que la vie est passionnante? | Oui Non |
| 20. Avez-vous des difficultés à entreprendre de nouveaux projets? | Oui Non |
| 21. Avez-vous beaucoup d'énergie? | Oui Non |

- | | |
|--|---------|
| 22. Désespérez-vous de votre situation présente? | Oui Non |
| 23. Pensez-vous que la situation des autres est meilleure que la vôtre | Oui Non |
| 24. Êtes-vous souvent irrité(e) par des détails? | Oui Non |
| 25. Éprouvez-vous souvent le besoin de pleurer? | Oui Non |
| 26. Avez-vous du mal à vous concentrer? | Oui Non |
| 27. Êtes-vous content(e) de vous lever le matin? | Oui Non |
| 28. Refusez-vous souvent les activités proposées? | Oui Non |
| 29. Vous est-il facile de prendre des décisions? | Oui Non |
| 30. Avez-vous l'esprit aussi clair qu'autrefois? | Oui Non |