



Vieillessement normal de la production de la parole

Mémoire

Mylène Bilodeau-Mercure

Maîtrise en médecine expérimentale
Maître ès sciences (M.Sc.)

Québec, Canada

© Mylène Bilodeau-Mercure, 2015

Vieillesse normale de la production de la parole

Mémoire

Mylène Bilodeau-Mercure

Sous la direction de :

Pascale Tremblay, directrice de recherche

Résumé

Plusieurs études ont démontré que le vieillissement affecte la production de la parole. Il existe toutefois peu de données sur les facteurs qui influencent la production de parole chez les aînés. Le but de ce mémoire était d'explorer les facteurs linguistiques et physiologiques pouvant affecter la production de la parole dans le vieillissement normal. La complexité séquentielle a été le facteur principalement étudié. Dans le cadre de deux études, 136 participants âgés de 18 à 93 ans ont produit des séquences de syllabes et d'autres mouvements fins. Les résultats de l'Étude 1 démontrent que la complexité séquentielle affecte la production de parole et de mouvements oro-faciaux dans le vieillissement. Les résultats de l'Étude 2 démontrent que la production de parole dans le vieillissement est affectée par la complexité articulatoire et par l'endurance des lèvres. Ces deux études clarifient les facteurs affectant la production de la parole lors du vieillissement normal.

Abstract

Several studies have shown that speech production decline with age. However, the factors that affect speech production in aging are not fully understood. The aim of this masters' thesis was to explore impacts of several linguistic and physiological factors on speech production. Sequential complexity was the main factor explored. In the context of two studies, 136 participants aged between 18 and 93 years old produced sequences of syllables and others finely controlled movements. Many physiological measures were evaluated. The results of the first study show an impact of sequential complexity on the production of speech and orofacial movements in aging. Results of the second study show that articulatory complexity and lip endurance impact speech production in older adults. These results clarify the effect of normal aging on speech production.

Table des matières

Résumé	III
Abstract	IV
Table des matières	V
Liste des tableaux.....	VI
Liste des figures.....	VII
Liste des abréviations	VIII
Remerciements	IX
Avant-propos	X
1 Introduction et problématique	1
1.1. Vieillessement normal.....	2
1.1.1. Cognition.....	2
1.1.2. Motricité fine	3
1.2. Vieillessement de la parole.....	4
1.2.1. Acte moteur du langage	4
1.2.2. Évaluation de la parole et de la voix	5
1.2.3. Vieillessement de la voix	7
1.2.4. Vieillessement de la parole.....	8
1.2.5. Complexité séquentielle	10
1.2.6. Complexité articulatoire (nasalité).....	11
1.2.7. Vieillessement physiologique	13
1.3. Objectifs et hypothèses	14
2 Étude 1 : <i>Movement sequencing in normal aging : speech, oro-facial and finger movements</i>	16
3 Étude 2 Impact of aging on sequential speech production : articulatory and physiological factors	41
4 Discussion et Conclusion.....	59
4.1. Synthèse des résultats principaux.....	59
4.1.1. Vieillessement de la parole : effets globaux.....	59
4.1.2. Vieillessement et complexité séquentielle.....	60
4.1.3. Vieillessement et complexité articulatoire.....	60
4.1.4. Vieillessement physiologique	61
4.1.5. Vieillessement et contrôle moteur fin.....	62
4.2. Forces et limites	63
4.3. Perspectives de recherche	65
4.3.1. Nasalité.....	65
4.3.2. Fréquence des syllabes.....	66
4.3.3. Facteurs physiologiques	66
4.4. Conclusion.....	68
Bibliographie	69

Liste des tableaux

Table 1: Participant's characteristics by age group (ÉTUDE 1).....21
Table 2: Examples of sequence for each type of stimulus23
Table 3 : Mean accuracy (percentage of errors) and standard deviation for each condition and group.25
Table 4 : Participants' characteristics by age group (ÉTUDE 2).....45
Table 5 : Stimuli47

Liste des figures

Figure 1 : Étapes de production d'un son de la parole — traduit et adapté de (Zemlin, 1998)5

Figure : 2 Position du voile du palais lors de la production de son oral et de son nasal — adaptation d'une image trouvée sur le site de l'Université de Lausanne (Université de Lausanne) 12

Figure 3 : Overall percentage of errors displayed as function of (a) sequence complexity (simple and complex), and (b) age group.26

Figure 4 : Percentage of errors displayed as function of age group for each movement.27

Figure 5 : Percentage of errors displayed as function of stimulus modality (visual or auditory) for each movement : (a) SPEECH, (b) MOUTH, and (c) FINGER. Asterisks indicate significant differences.28

Figure 6 : Complexity effect ([percentage of errors for complex sequences] – [percentage of errors for simple sequences]) displayed as function of age group, separately for each movement : (a) SPEECH, (b) MOUTH, and (c) FINGER. Asterisks indicate significant differences..... 29

Figure 7 Percentage of errors for the simple and complex sequences displayed as of function age group for : (a) SPEECH, and (b) MOUTH 29

Figure 8 : (a) Position of the fingers on USB response pad (Cedrus, model models RB-830) during the FINGER task. The bar graphs illustrate the results for the additional analyses conducted on the finger movements. Asterisks indicate significant differences. (b) Reaction time as a function of complexity; (c) Response duration as function of age group; (d) Response duration as function of sequence complexity. 31

Figure 9 : (a) Response accuracy (percentage of errors), and (b) Response rate (in syllables per seconds), displayed as a function of articulatory complexity (oral, mixed, nasal) and age (young, older adults). Asterisks indicate significant differences. The error bars represent the standard error of the mean.50

Figure 10 : Response accuracy (percentage of errors) displayed as a function of sequential complexity (intermediate, complex) for (a) ORAL sequences, (b) MIXED sequences and (c) NASAL sequences. Asterisks indicate significant differences. 50

Figure 11 : Measures of orofacial physiology (a) Tactile sensitivity (mm), (b) Endurance (in seconds), and (c) Strength (kPa), displayed as a function of articulator (lips, tongue) and age (young, older adults). Asterisks indicate significant differences. The error bars represent the standard error of the mean. (d) Mediation model that was used to investigate the impact of orofacial physiological measures on speech production in aging..... 52

Liste des abréviations

DDK	Diadochokinésie
EEG	Électroencéphalographie
EMG	Électromyographie
MOCA	Montreal Cognitive Assessment scale
PTA	Pure tone average
RT	Reaction Time

Remerciements

D'abord, je tiens à remercier Pascale Tremblay, directrice de maîtrise, qui était toujours disponible pour me conseiller et répondre à mes questions. Ta passion pour la recherche est remarquable. J'ai appris énormément sous ta supervision.

Merci à tous mes collègues de labo qui m'ont aidée, de près ou de loin, dans mon projet et qui ont égayé mes journées au centre de recherche. Un merci en particulier à Claudie (Chatonneau) Ouellet qui a parcouru la ville de recrutement en recrutement et qui a été soumise à de nombreuses heures d'écoute. Un merci spécial également à Anne-Marie et à Ariane, plus que des collègues et des taxis, vous êtes devenues des amies précieuses.

Je remercie toutes mes amies d'ici à l'Abitibi, particulièrement Alexandra, Aude et Marilou. Grâce à votre joie de vivre, vos pépites de chocolat et votre basilic, vous avez su me motiver dans les moments de découragements et me faire apprécier chaque réussite.

Merci à toute ma famille qui, malgré la distance, m'a toujours encouragée dans mes projets. Vous m'avez communiqué le désir d'apprendre et vous avez toujours cru en moi.

Merci à mon copain, Jean-Philippe, qui m'a accompagnée tout au long de ce projet. Tu as supporté mes longues heures d'écoute à la maison et tu as toujours été présent lorsque j'avais besoin d'un cobaye. Tu as été un motivateur incroyable et tu as mis du bonheur dans ma vie.

Finalement, merci à tous les participants qui ont accepté de donner de leur temps pour mes projets.

Avant-propos

Les résultats présentés dans ce mémoire sont rapportés sous forme d'articles expérimentaux ayant déjà été publiés ou soumis pour publication :

1. Bilodeau-Mercure, M., Kirouac, V., Langlois, N., Ouellet, C., Gasse, I., & Tremblay, P. (2015). Movement sequencing in normal aging : speech, oro-facial, and finger movements. *Age (Dordr)*, 37(4), 9813. doi : 10.1007/s11357-015-9813-x

2. Bilodeau-Mercure M., & Tremblay P. (Soumis) Impact of aging on sequential speech production : articulatory and physiological factors. *Journal of the American Geriatric Society*.

La première étude est insérée au chapitre 2 de ce mémoire. L'article est présenté tel que publié dans le journal *Age*. L'article a été rédigé par Mylène Bilodeau-Mercure (MBM). MBM a également participé au recrutement et à l'évaluation des participants, a contribué aux analyses acoustiques et a effectué toutes les analyses statistiques. Les coauteurs Vanessa Kirouac, Nancy Langlois, Claudie Ouellet et Isabelle Gasse ont participé aux procédures de recrutement et d'évaluation des participants (VK, NL, CO, IG) ainsi qu'aux analyses acoustiques des données (VK, NL, CO, IG) et à la préparation des stimuli utilisés (IG). Pascale Tremblay, directrice de la maîtrise, a élaboré le protocole, a supervisé la préparation des stimuli ainsi que la collecte de données, a participé à l'élaboration des analyses et elle a corrigé, révisé et bonifié les différentes versions du manuscrit.

La deuxième étude est insérée au chapitre 3 de ce mémoire. L'article est présenté tel que soumis au *Journal of the American Geriatric Society*. L'article a été rédigé par Mylène Bilodeau-Mercure. MBM a effectué le recrutement et l'évaluation des participants ainsi que toutes les analyses acoustiques et statistiques. Pascale Tremblay, directrice de la maîtrise, a participé à l'élaboration du protocole ainsi qu'à l'élaboration des analyses et elle a corrigé, révisé et bonifié les différentes versions du manuscrit.

1 Introduction et problématique

Selon Statistique Canada, entre 1971 et 2011, la proportion de personnes âgées de plus de 65 ans est passée de 8 % à 14 %, ce qui correspond à 5,0 millions de personnes au Canada. Selon les projections démographiques, la proportion d'ainés au Canada pourrait augmenter jusqu'à 25 % en 2036 ([Statistique Canada](#)). De nombreux changements, autant cognitifs que moteurs, surviennent au cours du vieillissement. Au Québec, les aînés étaient le groupe ayant le plus haut taux d'incapacité (22,3 % des aînés de 65 à 74 ans et 45,5 % des aînés de 75 ans et plus en 2006) et le plus haut taux de maladie chronique (72,8 % des aînés de 65 à 74 ans et 83,9 % des aînés de 75 ans et plus en 2007-2008) ([Institut de la statistique du Québec](#)). Avec le vieillissement de la population, la proportion de personnes présentant des incapacités ou des maladies chroniques pourrait augmenter dans la population globale au cours des prochaines années.

Selon l'organisation Orthophonie et Audiologie Canada (OAC), un Canadien sur six est atteint d'un trouble de la parole, de la voix ou de l'audition ([Orthophonie et Audiologie Canada \(OAC\)](#)). Les personnes âgées peuvent éprouver des difficultés perceptuelles, phonatoires ou articulatoires pouvant affecter négativement leur habileté à communiquer et, plus généralement, à fonctionner en société; autant de facteurs qui favorisent l'isolement social. Toutefois, peu d'études se sont intéressées au vieillissement de la production de la parole, laquelle consiste en la capacité à produire les différents sons du langage. Néanmoins, des études ont démontré un ralentissement du débit de parole ainsi qu'une augmentation du nombre d'erreurs (ex. : substitution ou omission de sons) ([Dromey, Boyce, & Channell, 2014](#); [Duchin & Mysak, 1987](#); [Fozo & Watson, 1998](#); [Morris & Brown Jr, 1987](#); [Ramig, 1983a](#); [Ryan, 1972](#); [Ryan & Burk, 1974](#); [Sadagopan & Smith, 2013](#); [Searl, Gabel, & Fulks, 2002](#); [Shuey, 1989](#); [Smith, Wasowicz, & Preston, 1987](#); [Tremblay & Deschamps, Revisions submitted](#); [Wohlert & Smith, 1998](#)). Dans le contexte de vieillissement de la population, il devient urgent de mieux comprendre les changements touchant la production de parole au cours du vieillissement normal afin de pouvoir distinguer les changements normaux des changements pathologiques, de poser des diagnostics différentiels plus précis et de développer des stratégies d'intervention plus ciblées pour les troubles de la parole associés au vieillissement. Afin de comprendre les impacts du vieillissement sur la production de la parole, le thème central de ce mémoire, il est nécessaire d'envisager le vieillissement de la communication dans le cadre plus large du vieillissement normal puisque les changements dans une sphère sont susceptibles d'affecter les autres sphères. Un survol des changements cognitifs et moteurs sera d'abord présenté dans ce chapitre, lequel sera suivi d'une revue de l'état des connaissances sur le vieillissement de la production de la voix et de la parole.

1.1. Vieillesse normale

1.1.1. Cognition

Le vieillissement normal est associé à de nombreux changements cognitifs, plusieurs ayant été bien documentés. Afin de concevoir des tâches qui évaluent réellement les changements relatifs à la production de la parole, il est nécessaire de bien connaître les changements cognitifs et moteurs survenant dans le vieillissement. D'abord, le ralentissement général des fonctions cognitives survient avec l'âge ([Anstey & Low, 2004](#); [Harada, Natelson Love, & Triebel, 2013](#); [Salthouse, 1996](#)). Ce ralentissement général pourrait expliquer une moins bonne performance des aînés à certaines tâches de langage comme la fluidité verbale ([Harada et al., 2013](#); [Meyerson, 1976](#)). D'autres tâches de langage, comme les tâches de vocabulaire, déclinent peu avec l'âge. En effet, la mémoire sémantique, c'est-à-dire la mémoire des faits (ex. : connaissances générales, vocabulaire), ne semble pas décliner avec l'âge et s'améliore même parfois. ([Anstey & Low, 2004](#); [Harada et al., 2013](#); [Park et al., 2002](#); [Ronnlund, Nyberg, Backman, & Nilsson, 2005](#)). La mémoire procédurale, c'est-à-dire la mémoire des habiletés motrices et cognitives bien apprises et automatisées (ex. : faire du vélo, attacher ses lacets, lire), semble également peu affectée par l'âge ([Harada et al., 2013](#); [Smith et al., 2005](#)). Cependant, plusieurs études ont démontré un déclin de la mémoire épisodique, c'est-à-dire la mémoire des événements (p. ex. : se souvenir de ce que nous avons mangé la veille) ([Dikmen et al., 2014](#); [Erber, 1974](#); [Harada et al., 2013](#); [Ronnlund et al., 2005](#)). La mémoire de travail, c'est-à-dire la capacité de retenir et de manipuler des informations à court terme afin de réaliser des opérations cognitives (p. ex. : se souvenir et manipuler les chiffres afin d'effectuer un calcul mental), semble aussi décliner avec l'âge ([Bopp & Verhaeghen, 2005](#); [Park et al., 2002](#)). Le vieillissement semble également entraîner une diminution des capacités attentionnelles ([Anstey & Low, 2004](#); [Gamboz, Zamarian, & Cavallero, 2010](#); [Harada et al., 2013](#); [Jennings, Dagenbach, Engle, & Funke, 2007](#)). En somme, une revue de la littérature révèle que le vieillissement normal est associé à des changements affectant plusieurs sphères, incluant la mémoire et l'attention. D'autres fonctions exécutives déclinent également (pour un aperçu plus complet du vieillissement cognitif, voir ([Hofer & Alwin, 2008](#))).

L'évaluation des capacités de production de la parole doit être effectuée en tenant compte de ces changements. Par exemple, il est souhaitable d'éviter les tâches qui exigent de mémoriser des éléments afin de ne pas confondre un déclin de la mémoire verbale avec un trouble de l'articulation. De plus, la connaissance des changements cognitifs survenant au cours du vieillissement permet de mieux comprendre le vieillissement de la production de la parole. Il est ainsi possible de lier certains changements affectant la production de la parole à un mécanisme général de vieillissement. Par exemple, étant donné le ralentissement des fonctions cognitives et motrices, il semble que le ralentissement du débit de la parole n'est pas un changement spécifique à ce comportement, mais qu'il fait plutôt partie du ralentissement global chez les personnes âgées.

1.1.2. Motricité fine

En plus des changements cognitifs, de nombreux changements se produisent sur le plan du contrôle moteur fin. Le contrôle moteur est la capacité à planifier et à exécuter des mouvements. Les actes moteurs fins se distinguent par leur grande précision (p. ex. : parler et écrire sont des mouvements fins, mais marcher ne l'est pas). Ces actes peuvent également être exécutés très rapidement. Lors de l'exécution des mouvements demandant un contrôle moteur fin, les rétroactions sensorielles sont prises en compte afin d'ajuster ou de corriger rapidement le mouvement au besoin.

L'étude du contrôle moteur fin porte fréquemment sur la capacité à accomplir des tâches sérielles de difficultés diverses. Spécifiquement, l'étude du contrôle des mouvements des doigts porte généralement sur la production de séquences de mouvements plutôt que des mouvements isolés puisque dans la réalité, les mouvements des doigts sont massivement sériels (pensez par exemple à l'action de taper sur un clavier). De nombreuses études ont démontré un ralentissement de la production de séquences de mouvements de doigts avec l'âge ([Aoki & Fukuoka, 2010](#); [Cacola, Roberson, & Gabbard, 2013](#); [Cousins, Corrow, Finn, & Salamone, 1998](#); [Jimenez-Jimenez et al., 2011](#); [Ruiz, Bernardos, Bartolome, & Torres, 2007](#)). En effet, les personnes âgées sont plus lentes que les jeunes à produire des séquences de trois à cinq tapements de doigts présentées visuellement ([Cacola et al., 2013](#)) ou à taper à répétition une touche le plus rapidement possible pendant 10 secondes ([Cousins et al., 1998](#)). Certains facteurs physiologiques pourraient contribuer à expliquer le déclin du contrôle moteur fin avec le vieillissement. Plusieurs études ont en effet démontré une diminution de la masse musculaire des jambes et des bras ([Lexell, 1995](#); [Rice, Cunningham, Paterson, & Lefcoe, 1989](#); [Vandervoort, 2002](#)). La diminution du volume des fibres musculaires, surtout les fibres de type 2 (les fibres rapides) ainsi que la diminution du nombre de fibres musculaires expliquent cette perte de masse musculaire ([Lexell, Taylor, & Sjöström, 1988](#); [Nilwik et al., 2013](#)). Le nombre d'unités motrices, c'est-à-dire des regroupements de fibres musculaires obéissants à un même motoneurone, semble également diminuer avec l'âge ([Gawel & Kostera-Pruszczyk, 2014](#); [Lexell, 1995](#); [Vandervoort, 2002](#)). D'autres mécanismes pourraient aussi contribuer à la baisse du niveau de contrôle moteur fin, comme des changements au niveau du système nerveux central; toutefois, ces autres hypothèses vont au-delà des thèmes abordés dans ce mémoire.

L'étude du vieillissement du contrôle des mouvements des doigts est particulièrement utile à la compréhension des mécanismes de vieillissement de production de la parole puisque la production de parole est également un acte moteur fin sériel. En effet, afin de produire chaque son, il est nécessaire de bouger rapidement et avec précision les lèvres, la langue et le voile du palais. De plus, la parole est essentiellement

produite en séquence, tout comme de nombreuses tâches de mouvements de doigts. En effet, parler ne consiste pas à produire une série de sons isolés, mais consiste plutôt en la production rapide de séquences de syllabes et de mots. L'augmentation de la complexité de la séquence entraîne une diminution de performance semblable lors de la production de séquences de syllabes ([Bohland & Guenther, 2006](#)) ou de mouvements de doigts ([Royer, 1967](#)). En effet, plus le nombre de mouvements différents augmente dans une séquence, plus la série est complexe à planifier et à produire. Il est possible que les changements observés lors de la production de mouvements de doigts soient des changements généraux de la capacité de séquençage et de production de mouvements fins, et par conséquent, que la production de parole dans le vieillissement subisse des changements similaires.

1.2. Vieillessement de la parole

Malgré la grande importance de la communication dans notre vie personnelle et professionnelle, l'impact du vieillissement sur la production de la parole est encore largement méconnu, de même que les mécanismes neurologiques et physiologiques pouvant engendrer ces changements. L'étude du vieillissement de la voix peut aider à la compréhension du vieillissement de la parole. En effet, comme la parole, la voix exige également un contrôle moteur fin des muscles du larynx afin de moduler la hauteur (grave ou aigu) et l'intensité de la voix. Dans cette section, une description de l'acte du langage ainsi que des outils utilisés afin d'évaluer la voix et la parole sera d'abord fournie, laquelle sera suivie d'une description approfondie de l'état des connaissances sur le vieillissement de la voix et de la parole.

1.2.1. Acte moteur du langage

Même si l'acte du langage est un comportement utilisé quotidiennement et produit de manière souvent automatique, il s'agit néanmoins d'un comportement extrêmement complexe tant sur le plan cognitif que sur le plan sensorimoteur. Il débute par l'intention de communiquer, suivi par la translation du message en mots qui sont ensuite convertis en syllabes, lesquelles sont ordonnées en série (séquençage) avant même que l'articulation commence. L'étape finale requiert la coordination de plusieurs systèmes sensorimoteurs incluant le système respiratoire qui fournit le flux d'air nécessaire à la vibration des cordes vocales, les muscles du

larynx¹ qui transforment le flux d'air des poumons en sons, produisant ainsi la voix², et finalement les muscles supra-laryngés³ qui modifient la configuration du conduit vocal pour convertir les sons produits par le larynx en séquences de voyelles et de consonnes, produisant ainsi la parole⁴. Plusieurs dizaines de muscles répartis dans l'abdomen, le cou et le visage participent à cette entreprise colossale. Les sons du langage sont produits par des mouvements extrêmement précis de la langue, des lèvres et du voile du palais, ainsi que par des contractions et des niveaux de tension très précis au niveau des cordes vocales qui nous permettent de produire un son spécifique à une hauteur et une intensité spécifiques. De toutes petites variations de ces mouvements entraînent la production de sons complètement différents. Parler est l'un des actes moteurs fins les plus complexes et les plus rapides que l'humain accomplit, pouvant aller aussi rapidement que six à neuf syllabes par seconde (Kent, 2000).

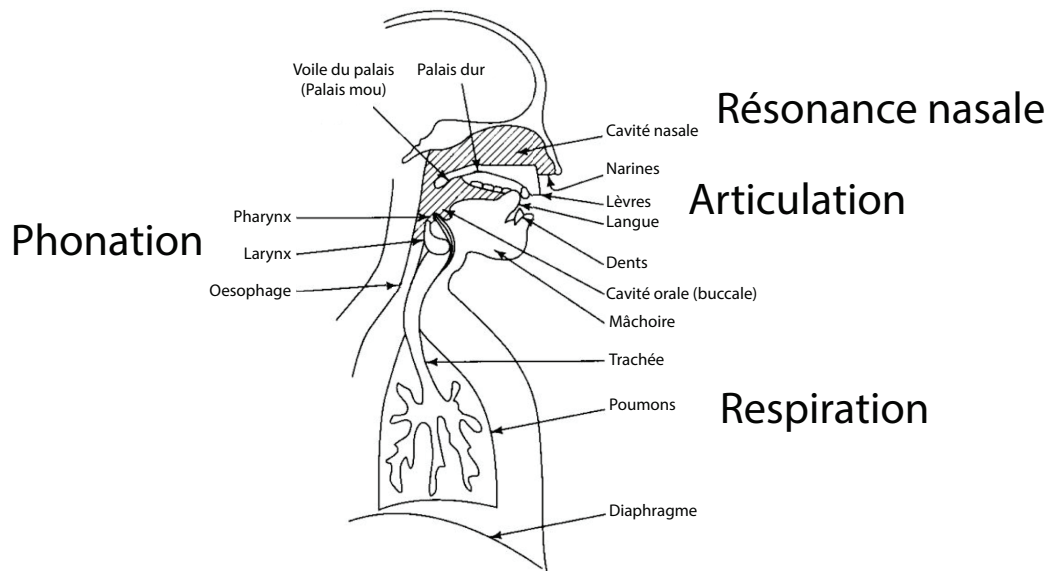


Figure 1 : Étapes de production d'un son de la parole — traduit et adapté de (Zemlin, 1998)

1.2.2. Évaluation de la parole et de la voix

Plusieurs mesures différentes sont utilisées pour évaluer la production de la parole et de la voix en fonction des questions de recherche, des objectifs et des hypothèses. Les plus connues incluent les analyses

¹ Muscles crico-thyroïdiens, muscles circo-aryténoïdiens postérieur et latéral, muscle inter-aryténoïdien, muscles thyro-aryténoïdiens.

² Le processus de production de la voix est appelé « phonation ».

³ Muscles de la langue : longitudinal supérieur, longitudinal inférieur, transversal, vertical, génioglosse, styloglosse; Muscles des lèvres : orbicularis oris, depressor labii inferior, levator labii superior, Muscle de velum : levator palatini, palato-glossus.

⁴ On distingue deux processus : l'articulation et la résonance nasale.

de la vitesse de production, du nombre d'erreurs, des temps de réaction, l'analyse acoustique du signal sonore et l'analyse de l'intelligibilité de la parole. Le calcul de la vitesse de production de la parole et le pourcentage d'erreur sont des mesures qui permettent de mesurer la performance à une tâche de parole. L'analyse acoustique permet d'observer en détail les différences de prononciation entre les participants ou entre des contextes linguistiques⁵ et est aussi grandement utilisée pour évaluer de nombreux paramètres de la voix (p. ex. : fréquence fondamentale⁶, intensité).

Différentes tâches peuvent être utilisées pour évaluer la production de la voix et de la parole. Les tâches de lecture de textes ou de phrases permettent de comparer facilement des participants puisque contrairement au discours dirigé (p. ex. : description d'une image), ces tâches assurent que tous les participants produisent les mêmes sons dans le même ordre. La tâche de phonation soutenue, qui consiste à dire un son à voix haute le plus longtemps possible, est également utilisée pour évaluer la voix. Une tâche de production de parole fréquemment utilisée est la tâche de phrases porteuses qui consiste à prononcer différents mots ou non-mots, ces derniers étant toujours incorporés dans la même phrase (p. ex. : Je pense _____ cette fois). Ce type de tâche est utile lorsqu'on s'intéresse à la différence acoustique de production entre des sons ou des syllabes puisque ces sons seront toujours prononcés dans le même contexte, c'est-à-dire dans la même phrase porteuse. Ces tâches peuvent être produites à différentes intensités (p. ex. : parler le plus fort possible), à différentes fréquences (p. ex. : parler le plus aigu possible) et à différentes vitesses (p. ex. : parler le plus vite possible); elles permettent ainsi de mesurer la *performance maximale*, c'est-à-dire de connaître la limite supérieure de la performance à une tâche. Mesurer la performance maximale est très important, car une performance maximale réduite peut diminuer la capacité d'une personne à ajuster sa voix à différentes situations et peut révéler si la production de la voix devient globalement plus difficile ([Kent, Kent, & Rosenbek, 1987](#)).

Par contre, ces tâches ne permettent pas d'éliminer l'influence linguistique (lexicale et sémantique) des mots lors de la production de la parole. De nombreuses études ont démontré des effets linguistiques facilitateurs. Ainsi, les lettres d'un mot sont perçues plus rapidement que les lettres d'un non-mot ([Allegretti & Puglisi, 1982](#); [Krueger & Weiss, 1976](#)). Plusieurs études démontrent également que les enfants produisent moins d'erreurs lors de production de mots plutôt que de non-mots ([Dispaldro, Benelli, Marcolini, & Stella, 2009](#); [Dispaldro, Leonard, & Deevy, 2013](#)). L'utilisation de non-mots et de syllabes sans signification permet d'éviter cette facilitation, et ainsi, d'évaluer les *capacités articulatoires maximales*. Une tâche de parole fréquemment utilisée est la tâche de diadochokinésie, qui est la répétition à vitesse maximale de syllabes (p. ex. : « pa pa pa » ou « pa ta ka pa ta ka ») en limitant les erreurs d'articulation. Cette tâche permet de mesurer

⁵ Environnement dans lequel un son est prononcé (p. ex: type de phrase, sons prononcés dans le même énoncé)

⁶ Corrélat acoustique de la hauteur de la voix, qui varie de grave à aigu

la *performance maximale* de la vitesse et de la justesse de l'élocution. Par contre, cette tâche a une moins grande validité écologique que les tâches de production de phrases. En effet, en contexte naturel, l'être humain adulte produit généralement des phrases, mais rarement des syllabes dénudées de sens. La connaissance des forces et des limites des différentes tâches utilisées pour mesurer la parole et la voix permet de mieux comprendre les résultats des différentes études portant sur le vieillissement de ces capacités.

1.2.3. Vieillessement de la voix

Plusieurs études ont démontré de nombreux changements affectant la production de la voix et de la parole au cours du vieillissement normal. Au niveau de la voix, des études ont démontré une diminution de la fréquence fondamentale de la voix [F0] pour les femmes ([Decoster & Debruyne, 1997](#); [Goy, Fernandes, Pichora-Fuller, & van Lieshout, 2013](#); [Honjo & Isshiki, 1980](#); [Stathopoulos, Huber, & Sussman, 2011](#); [Torre & Barlow, 2009](#)). Une étude de D'Haeseleer et coll. suggère que les changements de fréquence fondamentale pouvaient survenir dès 50 ans ([D'Haeseleer, Depypere, Claeys, Wuyts, et al., 2011](#)). Chez les hommes, certaines études démontrent une augmentation de la fréquence fondamentale dans le vieillissement ([Decoster & Debruyne, 1997](#); [Honjo & Isshiki, 1980](#); [Hunter, Kapsner-Smith, Pead, Engar, & Brown, 2012](#); [Torre & Barlow, 2009](#)). Par contre, d'autres études n'ont pas démontré de changement significatif ([Goy et al., 2013](#); [Orlikoff, 1990](#); [Wilcox & Horii, 1980](#); [Zraick, Smith-Olinde, & Shotts, 2012](#)). Ces résultats divergents pourraient s'expliquer par la trajectoire non linéaire des changements au niveau de la fréquence fondamentale. En effet, une étude a démontré une diminution de la fréquence fondamentale de 4 à 50 ans et par la suite, une augmentation ([Stathopoulos et al., 2011](#)). Les études qui se sont intéressées aux autres paramètres de la voix, comme l'amplitude et le temps de phonation maximum, ou aux mesures de stabilité de la voix (*jitter et shimmer*) présentent également des résultats divergents. En effet, certaines études démontrent un effet de vieillissement, alors que d'autres non ([Baker, Ramig, Sapir, Luschei, & Smith, 2001](#); [Lortie, Thibeault, Guitton, & Tremblay, Révisions soumises](#); [Wilcox & Horii, 1980](#)). Par contre, ces différences entre les études s'expliquent peut-être par la variation de l'effet du vieillissement selon le sexe des participants ([Goy et al., 2013](#); [Rivard, Lortie, Thibeault, & Tremblay, Soumis](#)). Malgré quelques divergences dans la littérature, le vieillissement a clairement un impact sur la voix. Par contre, d'autres études sont nécessaires pour comprendre plus en profondeur ces changements, leur trajectoire ainsi que les facteurs qui les influencent.

1.2.4. Vieillessement de la parole

La voix n'est pas la seule composante de l'acte moteur du langage à être affectée par le vieillissement. Plusieurs études ont démontré un effet négatif de l'âge sur la vitesse de production de la parole lors de la répétition de mots et de phrases ([Dromey et al., 2014](#); [Fozo & Watson, 1998](#); [Wohlert & Smith, 1998](#)) ou de non-mots ([Sadagopan & Smith, 2013](#); [Tremblay & Deschamps, Revisions submitted](#)) ainsi que lors de production de discours dirigé ([Duchin & Mysak, 1987](#); [Searl et al., 2002](#)). Ce déclin de vitesse n'est pas uniquement dû à des pauses plus longues puisqu'un ralentissement est encore observé lorsque les pauses entre les phrases sont exclues du calcul de vitesse de production de la parole ([Ramig, 1983a](#); [Ryan, 1972](#)), ce qui suggère que les mouvements eux-mêmes sont effectués plus lentement. Ces résultats suggèrent que la production des sons de la parole devient intrinsèquement plus lente avec le vieillissement. Ce ralentissement de la production des sons a été confirmé par certaines études qui ont démontré une augmentation dans la durée des sons et des syllabes individuels lors de la production de mots ou de phrases ([Morris & Brown Jr, 1987](#); [Ryan & Burk, 1974](#); [Smith et al., 1987](#)). Par contre, les causes de la diminution de la vitesse d'élocution avec l'âge sont encore méconnues.

La vitesse n'est pas le seul facteur de production de la parole qui décline avec l'âge. Des chercheurs ont démontré que les personnes âgées étaient jugées par des orthophonistes comme étant moins intelligibles que les jeunes lorsqu'elles produisaient une tâche de diadochokinésie (DDK) (c.-à-d. une répétition rapide de syllabe, donc une performance maximale) ([Parnell & Amerman, 1987](#)). L'intelligibilité est la capacité d'un locuteur à se faire comprendre par un interlocuteur, ce qui en fait une capacité essentielle à une communication efficace. Par contre, une étude des mêmes auteurs a démontré que les personnes âgées n'étaient pas jugées moins intelligibles que les personnes jeunes lorsqu'elles lisaient à voix haute un passage standardisé, une tâche considérée comme plus naturelle que la tâche de DDK ([Amerman & Parnell, 1990](#)). Dans ces études, l'intelligibilité de la production globale des participants était jugée de façon subjective par des professionnels de la parole : des orthophonistes. L'intelligibilité peut dépendre de nombreux facteurs comme une vitesse d'élocution inadéquate, une intensité trop faible ou encore une mauvaise articulation. La mesure d'intelligibilité ne permet pas de déterminer les facteurs qui sont affectés par le vieillissement.

Plusieurs études ont démontré que la précision articulatoire est un facteur déterminant de l'intelligibilité ([Hartelius, Gustavsson, Astrand, & Holmberg, 2006](#); [Hazan & Markham, 2004](#); [Markham & Hazan, 2004](#); [Wenke, Cornwell, & Theodoros, 2010](#)). Le pourcentage d'erreur est fréquemment utilisé afin de mesurer la capacité articulatoire. Dans les études s'intéressant au nombre d'erreurs lors de la production de la parole, la

production de chaque son est évaluée pour savoir si elle correspond au son attendu.⁷ Dans une étude de Shuey, des femmes âgées de 18 à 37 ans ont écouté et transcrit une série de mots faisant partie d'une phrase porteuse. Ces phrases pouvaient être prononcées par des personnes jeunes ou âgées. Les participants ont fait significativement plus d'erreurs de transcription sur les consonnes finales prononcées par les personnes âgées que celles prononcées par les jeunes (Shuey, 1989). Par contre, d'autres études n'ont pas trouvé de différence entre le nombre d'erreurs produites par les jeunes adultes et les personnes âgées lorsqu'ils produisaient des « virelangues » [angl. Tongue twisters] (p. ex. : five frantic fat frogs) avec une faible vitesse d'élocution (Vousden & Maylor, 2006) ou lorsqu'ils produisaient des séquences de syllabes présentées visuellement (Tremblay & Deschamps, Revisions submitted). Ces divergences entre les études pourraient être expliquées par la complexité des tâches de parole utilisées. En effet, une étude a démontré que les personnes âgées font plus d'erreurs que les jeunes lorsqu'elles produisent un long non-mot (p. ex. : mabskreesploystroob), mais elles ne font pas plus d'erreurs que les jeunes lorsqu'elles produisent un non-mot plus court (p. ex. : mab) (Sadagopan & Smith, 2013). Ainsi, la littérature démontre que le vieillissement normal entraîne des changements importants au niveau de la voix et de la parole. En ce qui concerne la parole, le ralentissement de la vitesse d'élocution dans le vieillissement fait consensus à travers les études. Par contre, l'impact du vieillissement sur le pourcentage d'erreur ou l'intelligibilité n'est pas toujours significatif à travers les études. Il est possible que la production de parole dans le vieillissement soit affectée par la complexité des stimuli produits par les participants et que cela explique les différences entre les études.

Il existe peu de données comportementales (analyses acoustiques, d'erreurs ou de temps de réaction) sur les facteurs de difficulté en production de la parole spécifiquement liés au vieillissement. Il n'est pas clair si certains types de sons ou certaines combinaisons (séquences) de sons sont plus vulnérables au vieillissement. Ce manque de données a des effets néfastes en clinique puisqu'il rend difficile la dissociation, sur le plan comportemental, des changements normaux et anormaux. Les problèmes de santé associés avec des troubles acquis de la parole augmentent avec l'âge, comme les troubles du système nerveux central tels que les accidents vasculaires cérébraux (Borovsky, Saygin, Bates, & Dronkers, 2007; Cohen, Elackattu, Noordzij, Walsh, & Langmore, 2009; Dronkers, 1996; Jordan & Hillis, 2006), les troubles neurologiques tels que la sclérose en plaques (Hartelius, Buder, & Strand, 1997; Hartelius, Runmarker, & Andersen, 2000; Hartelius, Runmarker, Andersen, & Nord, 2000; Hartelius & Svensson, 1994) et les désordres neurologiques dégénératifs tels que la maladie de Parkinson (Hartelius & Svensson, 1994; Logemann, Fisher, Boshes, & Blonsky, 1978; Ramig, Fox, & Sapir, 2004; Trail et al., 2005) et la maladie de Huntington (Klasner & Yorkston, 2001). Un déclin anormal de production de la parole dans le vieillissement peut être un indice d'un déclin pathologique relié à ces problèmes de santé. Il est possible que la détection rapide d'un déclin anormal de

⁷Lorsque l'intelligibilité est mesurée, la qualité de la production de la parole est généralement évaluée sur une échelle. Lorsque le pourcentage d'erreur est mesuré, chaque son est évalué pour savoir s'il correspond au son attendu, et ce, de façon binaire (oui, non).

production de la parole permette un diagnostic hâtif dans l'évolution d'un trouble de santé, et ainsi, une intervention précoce. Conséquemment, il est primordial de savoir quelles caractéristiques de la parole déclinent avec le vieillissement.

1.2.5. Complexité séquentielle

Bien que peu d'études aient caractérisé l'articulation de la parole, des données recueillies lors d'une étude au sein de notre laboratoire suggèrent que le vieillissement affecte le séquençage moteur de la parole ([Tremblay & Deschamps, Revisions submitted](#)). Tel que mentionné à la section 1.1.2, le séquençage est la capacité à produire des séries de mouvements organisées sur le plan temporel. En parole, ces mouvements sont les sons (phonèmes) ou les syllabes, selon le niveau d'analyse sur lequel on se positionne. Le séquençage est un mécanisme extrêmement important dans la communication puisque la parole est intrinsèquement sérielle. Par conséquent, il est important de bien connaître l'impact du vieillissement sur cette fonction. La complexité séquentielle peut être manipulée de différentes manières, soit en augmentant le nombre total de sons qu'une séquence contient (sa longueur), ou en augmentant le nombre de sons différents qu'elle contient, le degré de différence entre les sons sur le plan articulatoire. En effet, une étude a démontré que produire des séquences simples (la même syllabe répétée plusieurs fois) est plus facile que produire des syllabes complexes (série de syllabes différentes) ([Bohland & Guenther, 2006](#)). De plus, des études ont démontré que des régions différentes du cerveau étaient activées lors de la production de mots ou de non-mots monosyllabiques et lors de la production de mots polysyllabiques ([Riecker et al., 2000](#); [Shuster & Lemieux, 2005](#)). Ces résultats suggèrent que les séquences de sons complexes sont traitées différemment des séquences de sons simples par le cerveau, demandant des ressources neurales additionnelles afin de planifier et produire des séquences motrices plus complexes. Par contre, peu d'études ont vérifié si l'impact de la complexité séquentielle augmentait dans le vieillissement. L'étude faite au sein de notre laboratoire portant sur le vieillissement normal des habiletés langagières ([Tremblay & Deschamps, Revisions submitted](#)) comparait la capacité à produire des séquences simples et des syllabes complexes. Les résultats démontrent une augmentation de la durée des réponses verbales pour des séquences complexes comparées à des séquences simples, et ce, de manière plus importante chez les personnes âgées que chez les jeunes. Cette augmentation de la durée se traduisait par une pause insérée au milieu de la séquence, reflétant une difficulté de séquençage, ou à tout le moins une différence de stratégie de séquençage liée à l'âge. Ces résultats sont cohérents avec ceux de l'étude de Sagodan & Smith. En effet, dans cette étude, plus le non-mot était long, plus la différence entre le nombre d'erreurs entre les jeunes et les aînés augmentait. Ces résultats suggèrent un effet de la complexité séquentielle. En effet, les mots longs étaient composés de différentes syllabes, et

non de la répétition d'une même syllabe, et étaient de ce fait de plus en plus complexes ([Sadagopan & Smith, 2013](#)). D'autres études sont nécessaires afin de mieux comprendre l'impact de la complexité séquentielle sur la production de parole dans le vieillissement.

1.2.6. Complexité articulatoire (nasalité)

En plus d'une augmentation potentielle de l'effet de la complexité séquentielle sur la production de la parole dans le vieillissement, il est également possible que certains sons ou certaines séquences de sons soient particulièrement difficiles à prononcer pour les personnes âgées sur le plan articulatoire. En effet, en plus d'être complexe sur le plan de l'organisation séquentielle, la parole est également très complexe sur le plan de l'articulation (complexité articulatoire), requérant une grande variété de mouvements rapides et précis de la langue (p. ex. : élévation du bout de la langue, du dos de la langue), de la mandibule, des lèvres et du voile du palais (pour produire des sons oraux vs nasaux). Bien que la majorité des études se soit concentrée sur la production de sons oraux, il est possible que la production de sons nasaux soit affectée par le vieillissement, conformément à ce qui a été suggéré par plusieurs études ([D'Haeseleer, Depypere, Claeys, & Van Lierde, 2011](#); [Seaver, Dalston, Leeper, & Adams, 1991](#)). Un son est nasal lorsque l'air, en plus de résonner dans la bouche, passe et résonne également dans la cavité nasale (p. ex. : /an, in, on, un, m, n et gn/). La capacité à produire des sons nasaux requiert le contrôle du voile du palais qui, en s'abaissant, permet de laisser circuler l'air par le nez (Figure 2). De plus, la coordination du mouvement du voile du palais avec les mouvements des lèvres et de la langue est nécessaire à la production de sons nasaux. En français, la nasalité est souvent présente et de nombreux mots ne diffèrent, à l'oral, que par leur nasalité (p. ex. : mot, mont). Ainsi, une difficulté de production des sons nasaux liée à l'âge pourrait être nuisible à l'intelligibilité de la parole des personnes âgées.

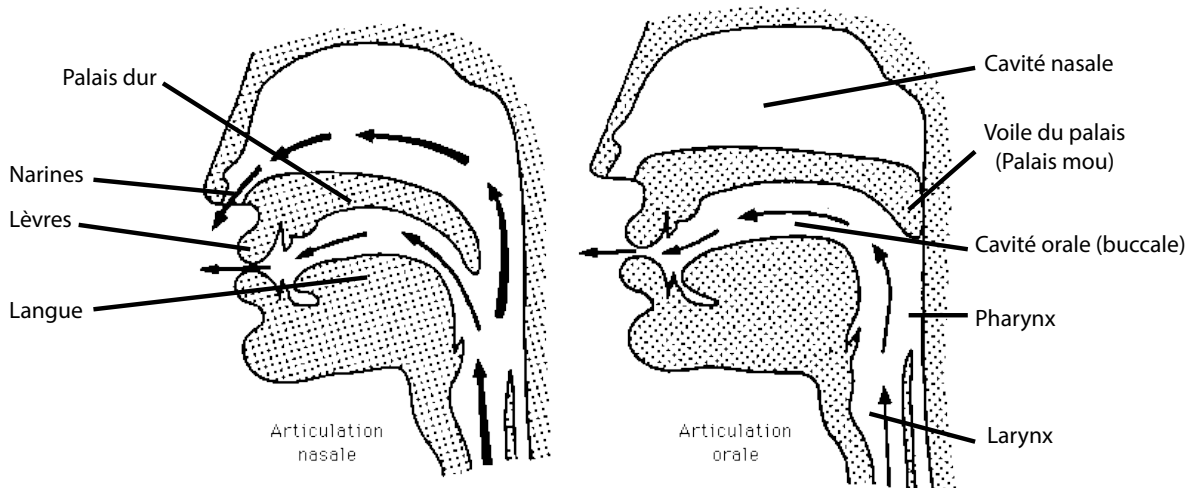


Figure : 2 Position du voile du palais lors de la production de son oral et de son nasal — adaptation d'une image trouvée sur le site de l'Université de Lausanne ([Université de Lausanne](#))

Certaines études semblent indiquer un moins bon contrôle du voile du palais avec l'âge. En effet, des études ont démontré que la *nasalance*, une mesure de comparaison entre l'énergie acoustique émise par le nez et l'énergie acoustique émise par la bouche, est plus élevée chez les personnes âgées que chez les jeunes ([D'Haeseleer, Depypere, Claeys, & Van Lierde, 2011](#); [Seaver et al., 1991](#)). Par contre, d'autres études n'ont pas trouvé de changement de *nasalance* dans le vieillissement ([Hutchinson, Robinson, & Nerbonne, 1978](#); [Rochet, Rochet, Sovis, & Mielke, 1998](#)). De plus, aucune différence n'a été trouvée lorsque la résonance nasale a été mesurée avec le flux d'air nasal ([Hoit, Watson, Hixon, McMahon, & Johnson, 1994](#)) ou jugée par des orthophonistes ([Amerman & Parnell, 1990](#)). L'effet de l'âge sur le contrôle du voile du palais demeure donc incertain. De plus, aucune étude ne s'est intéressée à la justesse (nombre d'erreurs) ou à la vitesse de production de sons nasaux chez les personnes âgées. La production de sons nasaux exige que le mouvement du voile du palais soit parfaitement coordonné avec les mouvements des lèvres et de la langue. Ainsi, une diminution de justesse ou de vitesse d'élocution pourrait refléter une difficulté de coordination de ces différents mouvements qui ne serait pas détectée avec une mesure de *nasalance* ou de flux d'air nasal. Il est possible que la nasalité, tout comme la complexité séquentielle, affecte la production de parole dans le vieillissement. Il est également possible que ces deux niveaux de complexité interagissent entre eux. Puisque les habiletés de séquençage semblent être affectées négativement par le vieillissement, il est possible que la complexité articulatoire intensifie les difficultés des personnes âgées à produire des séquences complexes. Ainsi, une séquence de sons différents, mais dont les paramètres articulatoires seraient similaires, pourrait être moins affectée par le vieillissement qu'une séquence de sons très différents sur le plan articulatoire. Par exemple, alterner des syllabes nasales et orales (p. ex : /ban, pa/) est peut-être plus difficile que d'alterner des

séquences de sons oraux (p. ex : /ba, pa/). Par contre, aucune étude n'a étudié l'impact de la complexité articulatoire sur la complexité séquentielle et l'interaction de ces deux facteurs.

1.2.7. Vieillesse physiologique

En plus de la complexité séquentielle et articulatoire, d'autres facteurs pouvant avoir un impact sur la production de la parole dans le vieillissement sont les nombreux changements physiologiques qui surviennent au niveau de la sphère oro-faciale. En effet, des études ont démontré que les personnes âgées ont une moins bonne sensibilité tactile oro-faciale que les jeunes ([Calhoun, Gibson, Hartley, Minton, & Hokanson, 1992](#); [Wohlert & Smith, 1998](#)). La production de la parole étant un acte demandant une grande précision, et reposant sur les rétroactions sensorielles ([Gracco, 1991](#); [Tremblay, Shiller, & Ostry, 2003](#)), il est possible que la perte de sensibilité tactile observée puisse avoir un impact sur la production de la parole, mais peu d'études ont exploré cette question à ce jour. De plus, la force des lèvres semble décliner ([Wohlert & Smith, 1998](#)). Par contre, un déclin de la force des lèvres lié au vieillissement n'a pas été observé lorsque le sexe des participants a été inclus dans l'analyse ([Clark & Solomon, 2012](#)), suggérant que le genre (et non l'âge) explique les variations de force labiale dans les populations étudiées. Par contre, la différence entre les deux études s'explique peut-être par la différence d'âge entre les participants. En effet, les aînés étaient plus âgés dans l'étude de Wohlert et Smith (en moyenne 79 ans) que dans l'étude que Clark et Solomon (en moyenne 70 ans). Des études ont également démontré une diminution de la force des muscles de la langue chez les aînés lors de mouvements d'élévation de la langue ([Crow & Ship, 1996](#); [Neel & Palmer, 2012](#); [Vanderwegen, Guns, Van Nuffelen, Elen, & De Bodt, 2013](#)). Ce déclin de force semble se produire tard dans le vieillissement. En effet, des études ont démontré une différence de force entre les jeunes et les aînés, mais seulement à partir de 70 ans ([Vanderwegen et al., 2013](#)) ou encore de 79 ans ([Crow & Ship, 1996](#)). Des différences d'âge entre les échantillons pourraient expliquer pourquoi certains chercheurs n'ont pas trouvé de différence de force pour un mouvement d'élévation de la langue dans le vieillissement ([Clark & Solomon, 2012](#); [Vitorino, 2010](#)). En effet, dans ces études, les groupes de personnes âgées étaient plus jeunes que dans l'étude de Vanderwegen et coll. ainsi que dans l'étude de Crow et Ship. De plus, une étude a démontré un déclin de force de la langue pour d'autres types de mouvements de la langue (protrusion et latéralisation) ([Clark & Solomon, 2012](#)). Par contre, la seule étude s'étant intéressée au lien entre le déclin de force de la langue et la production de parole n'a pas trouvé de relation entre la force et la vitesse d'élocution lors de répétition de syllabes (DDK) ([Neel & Palmer, 2012](#)). D'autres facteurs physiologiques pourraient également décliner avec l'âge, comme l'endurance des lèvres, mais les études antérieures n'ont pas mesuré ce facteur. Bien que de nombreux changements se produisent dans la sphère oro-faciale avec le vieillissement, une seule étude a

vérifié l'impact d'un de ces changements sur la production de la parole. C'est pourquoi des études sont nécessaires afin de comprendre si ces changements physiologiques sont des facteurs de difficultés de production de parole chez les personnes âgées, tels que le ralentissement de la production de parole et l'augmentation des erreurs.

En conclusion, le vieillissement entraîne de nombreux changements, tant au niveau cognitif que moteur. La production de la parole et de la voix sont des comportements complexes qui semblent affectés par le vieillissement. Par contre, bien que plusieurs études aient observé des difficultés de production de parole chez les aînés, très peu d'études ont exploré à ce jour les facteurs pouvant affecter la production de la parole dans le vieillissement normal et les impacts spécifiques du vieillissement sur différents paramètres de la production de la parole. Tel que mentionné à la section 1.1.5, une étude de notre laboratoire suggère que la complexité séquentielle pourrait avoir un impact sur la capacité à produire la parole dans le vieillissement. Il est également possible que certains sons soient plus difficiles à produire que d'autres, comme les sons nasaux [complexité articulatoire]. Enfin, les causes physiologiques sous-jacentes aux changements affectant la production de la voix et de la parole sont largement inconnues à ce jour.

1.3. Objectifs et hypothèses

L'objectif général de ce mémoire est d'examiner l'impact des facteurs linguistiques et physiologiques sur la production de la parole au cours du vieillissement, et ce, au moyen de deux études semi-expérimentales de groupe. L'impact de la complexité séquentielle sur la production de la parole dans le vieillissement est le facteur principalement étudié. Des objectifs spécifiques ont été déterminés pour chaque étude. Notre hypothèse générale était que la performance diminuerait avec l'âge en général, particulièrement avec l'augmentation de la complexité séquentielle.

L'objectif de l'Étude 1 est de déterminer si la complexité séquentielle et l'âge affectent la performance, mesurée en terme de pourcentage d'erreur, lors de la production de parole, et si ce déclin est spécifique au contrôle moteur de la parole ou s'il fait plutôt partie d'un phénomène général de vieillissement des actes moteurs fins. Plus spécifiquement, cette étude vise à comparer la capacité à produire la parole à la capacité à produire des séquences de mouvements oro-faciaux [de la bouche] et des mouvements des doigts chez des adultes jeunes et âgés en santé, en fonction de la complexité des séquences de mouvements à produire. L'hypothèse de l'Étude 1 était que l'augmentation en complexité séquentielle et en âge entraîne un déclin de performance lors de la production de mouvements fins. De plus, notre hypothèse était que le déclin de la production de la parole est un phénomène général de vieillissement du contrôle des actes moteurs fins, et

que, conséquemment, tous les mouvements fins sont affectés de manière similaire par l'âge et la complexité séquentielle.

L'objectif de l'Étude 2 est d'explorer l'impact des facteurs linguistiques et physiologiques sur la production de parole dans le vieillissement. Plus spécifiquement, l'objectif est de vérifier la relation entre le vieillissement et la performance lors d'une tâche de production de séquences de syllabes ainsi que d'observer les facteurs pouvant influencer cette relation. Les facteurs d'intérêts sont : [1] la complexité séquentielle, [2] la résonance nasale [complexité articulatoire] et [3] la force, l'endurance et la sensibilité tactile de la langue et des lèvres. L'hypothèse centrale de l'Étude 2 était que l'augmentation en complexité séquentielle et articulatoire entraînerait une plus grande difficulté pour les personnes âgées que pour les jeunes, laquelle se traduirait par une augmentation du nombre d'erreurs commises et un ralentissement du débit de parole. De plus, notre hypothèse secondaire était qu'une diminution de l'endurance et de la sensibilité oro-faciale aurait un impact négatif sur la production de parole.

2 Étude 1 : *Movement sequencing in normal aging : speech, oro-facial and finger movements*

Running title: Speech production in aging

Authors: Bilodeau-Mercure, Mylène¹, Kirouac, Vanessa^{1,2}, Langlois, Nancy^{1,2}, Ouellet, Claudie¹, Gasse, Isabelle, and Tremblay, Pascale^{1,2}

1. Centre de Recherche de l'Institut Universitaire en Santé Mentale de Québec, 2601 de la canardière, Québec City, QC, Canada
2. Département de Réadaptation, Faculté de Médecine, Université Laval, Québec City, QC, Canada

Référence complète:

Bilodeau-Mercure, M., Kirouac, V., Langlois, N., Ouellet, C., Gasse, I., & Tremblay, P. (2015). Movement sequencing in normal aging : speech, oro-facial, and finger movements. *Age (Dordr)*, 37(4), 9813. doi : 10.1007/s11357-015-9813-x

Résumé : Le but de cette étude était de vérifier l'impact de la complexité séquentielle et de l'âge sur la production de parole et d'autres mouvements fins. Dans cette étude, 76 participants en bonne santé, âgés de 18 à 93 ans, ont produit des séquences de mouvements fins (syllabes, mouvements de doigts et mouvements oro-faciaux). Les séquences à produire étaient présentées aux participants visuellement ou auditivement et étaient (1) simples, c.-à-d. composées d'au moins deux éléments identiques ou (2) complexes, c.-à-d. composées d'éléments différents. Le pourcentage d'erreur par séquence a été calculé pour chaque condition. Les résultats démontrent que pour la parole et les mouvements oro-faciaux, le pourcentage d'erreur augmente avec l'âge et la complexité. Pour ces mouvements, l'effet de la complexité sur la performance augmente avec l'âge. Pour les mouvements de doigts, un effet d'âge et de complexité est observé sur la durée des réponses, mais pas sur le pourcentage d'erreur.

Abstract: The aim of this study was to explore the impact of sequential complexity and age on the production of speech and others finely controlled movements. 76 healthy, cognitively normal participants aged between 18 and 93 years old were asked to produce auditorily and visually triggered sequences of finely controlled movements (speech, oro-facial and manual movement). These sequences were either simple, in which at least two of the three movements were the same, or complex, in which three different movements were produced. For each of the resulting experimental condition, accuracy was calculated. The results show that, for speech and oro-facial movements, accuracy declined as a function of age and complexity. For these movements, the negative effect of complexity on accuracy increased with age. No aging or complexity effects were found for the manual movements on accuracy, but duration increase with age and complexity.

Introduction

Speech is one of the most distinguishing features of the humankind. The act of speaking is an extremely complex behavior, both cognitively and at the sensorimotor level. It begins with an intention to communicate, continues to the translation of the message into words, which are converted in syllables that in turn need to be ordered serially (*i.e.* sequenced) before articulation can begin. The final output stage of this complex process requires the coordination of multiple sensorimotor components for the production of fluent speech, including the respiratory system, which provides the airflow necessary to set the vocal folds into vibration, the laryngeal muscles that convert the flow of air from the lungs into speech sounds (phonation), and, finally, the supra-laryngeal muscles that change the configuration of the vocal tract to convert the laryngeal output into sequences of vowels and consonants (articulation). In spite of this complexity, the chain of events that leads to the production of speech occurs within several hundreds of milliseconds. Indeed, adult speakers may produce as many as six to nine syllables per second ([Kent, 2000](#)). Despite the importance of communication on quality of life, the manner and extent to which speech behaviour, from respiration to articulation, change throughout adulthood, as well as the nature of the cognitive, physiological, and neurobiological mechanisms that underlie these changes is not well understood.

Previous studies have shown age-related changes in voice *fundamental frequency* [F0] (*i.e.* the acoustical correlate of voice *pitch*, which ranges from low to high) ([Decoster & Debruyne, 1997](#); [Honjo & Isshiki, 1980](#); [Hunter et al., 2012](#); [Linville, 1996](#); [Mueller, 1997](#); [Ramig, 1983b](#)), which would begin as early as ~50 years ([D'Haeseleer, Depypere, Claeys, Wuyts, et al., 2011](#)). Older adults also have higher *jitter* – a measure of cycle-to-cycle variation of vocal F0 (*i.e.* the acoustical correlate of pitch fluctuations) – compared to younger adults ([Wilcox & Horii, 1980](#)). In addition to changes in F0 and jitter, voice loudness also changes (decrease) in aging ([Baker et al., 2001](#)), affecting males more than females ([Goy, Fernandes, Pichora-Fuller, & van Lieshout, 2013](#)). A decline in speech rate has also been reported for the repetition of words or sentences ([Fozo & Watson, 1998](#); [Wohler & Smith, 1998](#)) or directed speech ([Duchin & Mysak, 1987](#); [Searl et al., 2002](#)), even when pauses between sentences were excluded from the calculation of speech rate, suggesting that the duration of speech sounds becomes longer with age ([Ramig, 1983a](#); [Ryan, 1972](#)). This is indeed consistent with the results of a few studies that have shown an age-related increase in the duration of individual speech sounds and syllables during repetition of words or sentences ([Morris & Brown, 1987](#); [Ryan & Burk, 1974](#); [Smith et al., 1987](#)). There is also limited evidence that aging affects speech intelligibility, that is, the capacity to produce speech sounds that can be recognized ([Shuey, 1989](#)). In this study, participants were asked to listen and write down to a series of words embedded in a carrier phrase pronounced by young and older adults, and they misunderstood significantly more often the final consonant pronounced by older compared to younger adults, suggesting an age-related decline in speech intelligibility. Consistent with this

finding, others researchers have reported that a group of 20 speech-language pathologists rated older adults (67 to 81 years old) as being less intelligible than younger adults (21 to 28 years old) in a diadochokinetic (DDK) task ([Parnell & Amerman, 1987](#)).

Though it is clear that the speech system undergoes important changes with age, little is known about the nature and scope of the underlying biological aging mechanisms. One approach to uncover the nature of these mechanisms is to compare aging of speech skills to the aging of other finely controlled movements (such as finger and oro-facial movements). This is particularly relevant given the apparent relationship between speech and finger movements and between speech and oro-facial movements ([Gentilucci, 2003](#); [Gentilucci, Dalla Volta, & Gianelli, 2008](#); [Tremblay & Gracco, 2009, 2010b](#)). Though this is not without some controversy, behavioural studies have shown that when adults manipulate an object at the same time as they produce syllables, the size of the object manipulated influences the degree of mouth opening, demonstrating a link between hand and speech movements ([Gentilucci, 2003](#); [Gentilucci et al., 2008](#)). Recent studies also suggest that several motor preparatory mechanisms, such as motor response selection mechanisms, engage similar neural resources for speech and oro-facial movements ([Tremblay & Gracco, 2009, 2010b](#)) as well as for speech and manual movements ([Tremblay, Shiller, & Gracco, 2008](#)). In this context, it is possible that aging of shared motor control mechanisms affects movement control in a general fashion. There is abundant literature documenting a decline of manual motor control with aging ([Aoki & Fukuoka, 2010](#); [Cacola et al., 2013](#); [Cousins et al., 1998](#); [Jimenez-Jimenez et al., 2011](#); [Ruiz et al., 2007](#)). For example, it has been shown that older adults are slower in producing different kinds of finger movements, including the production of sequences of three to five finger taps triggered visually ([Cacola et al., 2013](#)) or tapping a key with one finger as rapidly as possible during 10 seconds ([Cousins et al., 1998](#)). A relationship has also been found between age and response time in a task requiring participants to tap their thumb with their index finger and then with each finger in rapid successions, whereby response time increased with age ([Ruiz et al., 2007](#)). Interestingly, such age effects appear to develop relatively late. For instance, it has been shown that older adults (65-92 years), but not middle-aged adults (40-63 years) were slower than younger adults (18-32 years) in producing rapid multi-finger tapping movements ([Cacola et al., 2013](#)).

Despite evidence of a relationship between speech, oro-facial and manual movements, to our knowledge, no study to date has examined whether aging mechanisms are movement-specific or domain-general. The goal of the present study was therefore to examine the effect of aging on the ability to produce sequences of fine motor actions (speech, oro-facial and manual movements) varying in complexity levels. We hypothesized that all sequences of movements would be affected by age and by sequence complexity. We also expected to find interactions between age and sequence complexity, with more complex sequences being more affected by aging across all kinds of movements. Because response sequencing is likely a domain-

general mechanism, we expected to find similar effects of age on motor sequence complexity across movement types.

Methods

Participants

85 participants were recruited to participate in the study. Of these, nine were excluded (~11%) either due to recording problems during the experiment ($n = 5$), difficulty complying with task demands in a specific condition ($n = 1$), because they did not complete the hearing assessment ($n = 1$), or because they did not meet the inclusion criteria ($n = 2$). The final group therefore contained 76 participants (mean age 53.0 ± 19.0 SD; range: 22-93 years; 50 females). As can be seen in Table 1, this group was divided into four subgroups based on age (Group 1: 22-34 years; Group 2: 37-54; Group 3: 55-69; Group 4: 70-93). For Group 4, all but one participant were aged between 70 and 83 years, and there was a 93-year-old participant. All participants were right-handed, as assessed by the Edinburgh Handedness Inventory ([Oldfield, 1971](#)), native speakers of Canadian French with a mean of 16.9 ± 4.2 years of education (range: 6-29 years). All participants had normal or corrected-to-normal vision and no self-reported speech, voice, language, psychological, neurological or neurodegenerative disorder at the time of the study and all were non-smokers. Participants were screened for depression using the Geriatric Depression Scale ([Yesavage et al., 1982](#)) and their cognitive level was assessed using the Montreal Cognitive Assessment scale (MOCA) ([Nasreddine, Chertkow, Phillips, Bergman, & Whitehead, 2003](#)). Because it has been suggested that a cut-off score of <26 for the MOCA may lead to false positives (i.e. classifying neurologically intact individuals as having a mild cognitive impairment) ([Waldron-Perrine & Axelrod, 2012](#)), in the present study, we included participants who scored 23 and more on the MOCA. Participants' characteristics are reported in Table 1. The study was approved by the Institutional Ethical Committee of the Institut Universitaire en Santé Mentale de Québec (#293-2012).

		Age	Years of education	MOCA*	Depression scale**	Laterality Quotient***	Right ear PTA (Hz)	Left ear PTA (Hz)
Group 1 (22-34 years) (n=20, 13 females)	Minimum	22	13	26	0	90	-28.67	-27
	Maximum	34	24	30	8	100	-16	-12
	Mean \pm SD	28.1 \pm 4.2	17.7 \pm 2.6	28.80 \pm 1.20	2.50 \pm 2.28	99.50 \pm 2.24	-20.12 \pm 3.76	-19.28 \pm 3.47
Group 2 age (37-54 years) (n=17, 8 females)	Minimum	37	11	25	0	70	-39.33	-36
	Maximum	54	24	30	9	100	-15.33	-12
	Mean \pm SD	45.9 \pm 5.5	16.7 \pm 4.2	27.64 \pm 1.56	1.65 \pm 2.50	97.06 \pm 8.49	-22.02 \pm 6.25	-19.39 \pm 5.41
Group 3 (55-69 years) (n=21, 17 females)	Minimum	55	12	26	0	90	-42.33	-35.67
	Maximum	69	29	30	8	100	-18.67	-13
	Mean \pm SD	61.8 \pm 5.2	18.1 \pm 4.1	28.19 \pm 1.63	1.48 \pm 2.18	99.52 \pm 2.18	-25.81 \pm 6.17	-23.22 \pm 6.18
Group 4 (70-93 years) (n=18, 12 females)	Minimum	70	6	23	0	78.95	-48.67	-51.33
	Maximum	93	24	30	9	100	-20.33	-17.67
	Mean \pm SD	76.9 \pm 5.7	14.8 \pm 5.2	26.67 \pm 1.68	2.28 \pm 2.59	97.07 \pm 6.06	-32.46 \pm 7.79	-32.07 \pm 7.85

* Max score at the MOCA is 30

** Max score for the depression scale is 30

***Max score for the laterality quotient is 100

Table 1: Participant's characteristics by age group (ÉTUDE 1)

Hearing assessment

Pure tone audiometry was performed using a clinical audiometer (AC40, Interacoustic) for each ear separately, at the following frequencies: .25, .5, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12 and 16 kHz. For each participant, a standard pure tone average (PTA: average of threshold at .5, 1 and 2 kHz) was computed for the left and right ear and used as a covariate in the statistical analyses. PTAs are used in clinical settings as a measure of hearing loss for speech because most speech sounds fall within this range ([Stach, 2010](#)). The result of the hearing assessment is provided in Table 1.

Procedure

Participants were seated in a quiet room in front of a laptop computer (Thinkpad W510, Lenovo). Following a short practice session, participants were asked to produce sequences of speech, oro-facial and finger movements in separate blocks. The task consisted in the production of meaningless sequences of (i) three French syllables (SPEECH), (ii) three oro-facial movements (MOUTH), and (iii) three finger movements (FINGER) (see Table 2). Trials were randomly interleaved with short inter-trial intervals ranging from 500 to 1250 ms (with a mean of 875 ms). Participants' oral responses (speech and mouth) were recorded using a high quality multidirectional headworn microphone (Shure, Beta 53) connected to a sound card (Fast Track C400, M-audio), which was in turn connected to a laptop computer. All oral responses were recorded with the software Audacity (Open source). Finger movements were recorded using a USB response pad (Cedrus, model models RB-830). Throughout the procedure, participants' fingers rested on the response pad (see Figure 8a).

Stimuli and motor responses

The syllables used in the SPEECH condition were complex (CCVC) syllables: /krik/, /drad/, /broub/, and /grug/ (see Table 2). Meaningless syllables were used to avoid linguistic top-down effects that can facilitate speech production and because they are useful in the evaluation of maximal performance. Indeed, difficult syllable tasks could reveal a decline in maximal performance differences ("reduced reserve"). This is important because a reduced reserve can impair a person's flexibility, that is, the ability to adjust speech output to different situations, and can also reveal whether the process of speaking is becoming overall more difficult ([Kent et al., 1987](#)). The oro-facial movements used in the MOUTH condition were (1) a kissing movement with the lips ("kiss"), (2) the production of a popping sound made with the two lips being pressed and opened ("pop"), (3) a sound made by pressing the tip of the tongue against the alveoles and then releasing the tongue ("tic"), and (4) a clapping sound also made with the tip of the tongue ("clap"). All movements produced a distinct sound. For the FINGER condition, participants were asked to position their right hand (thumb, index, middle, or ring finger) on the response pad and to press specific buttons when instructed.

Movement type	Stimuli	Simple sequence	Complex sequence
SPEECH	krik	krik krik krik	krik grug drad
	drad		
	broub	krik krik grug	drad broub krik
	grug		
MOUTH	pop	bec bec bec	bec pop tic
	bec (kiss)		
	tic	pop tic tic	pop tic bec
	clac		
FINGER	bleu (blue)	vert vert vert	jaune bleu rouge
	(thumb)		
	jaune (yellow)		
	(index)	jaune jaune vert	vert jaune bleu
	rouge (red)		
	(middle finger)		
vert (green)			
(ring finger)			

Table 2: Examples of sequence for each type of stimulus

All motor responses (SPEECH, MOUTH and FINGER) were triggered either visually or auditory. In the auditory condition, participants were presented, through high quality headphones (Shure, SRH440), with recordings of (1) the syllables, (2) the sounds of the oro-facial movements, (3) the color of the button to press (“red, blue, green, yellow”). Auditory stimuli were read by native speaker of French Canadian in a soundproof room, and recorded with Sound Studio 3.5.4 software (Felt Tip Software) at a sampling rate of 44 KHz. Stimuli were edited using Wave Pad Sound Editor 4.53 (NHC Software) to standardize their duration to 1200 ms and normalize the root mean square (RMS) intensity of the sound files. In the visual condition, participants were presented with (1) the syllables written on the computer screen, (2) the name of oro-facial movement (“kiss, pop, tic and clap”), and (3) the name of the color of the button they needed to press (“red, blue, green, yellow”). All stimuli (visual and auditory) were presented using Presentation Software (Neurobehavioral System, CA, USA). The presentation of the stimuli lasted for 1800 ms and was followed, after an average of 1050 ms, by a green-coloured visual response cue (√) that remained on the screen for 3500 ms. At the end of this period, a red-coloured stop cue (X) was presented indicating to participants to stop responding. The stop cue remained on the screen until the beginning of the following trial, which occurred, on average, 875ms later (range 750 ms – 1250 ms).

Two types of sequences were performed. The sequences were either of simple, in which at least two of the three movements were identical and performed one after the other (ex: /krik krik krik/ or /pop pop clac/), or more complex, in which three different movements were produced (ex: /drad krik grug/ or /tic clac kiss/). Examples of sequences are reported in Table 2. The experiment included 24 trials of each condition (3 movements x 2 complexity levels x 2 modalities) for a total of 288 trials. These trials were divided into six experimental runs (2 runs for each movement modality). Within each run, the complexity of the movements was randomized while the other factors (stimuli modality and movement type) were kept constant to avoid task-switching effects not of interest in this experiment. The order of the runs was counter-balanced across participants. For all type of responses (SPEECH, MOUTH and FINGER), the different movements (e.g.: krik/, /drad/, /broub/, and /grug/) were produced a similar number of times (i.e. between 16 and 19 times) across modality and complexity level.

Behavioural data analysis

Data analyses focused on performance, measured as a percentage of errors per sequences for each condition (number of incorrect movements divided by total number of movement produced). Errors included errors of commission, errors of omission and production of additional movements. Accuracy was calculated based on the number of runs included in the analysis. A run was kept only if at least 50% of sequences were completed. For the analyses of SPEECH and MOUTH mistakes, a research assistant naive to the purpose of the study listened to and transcribed the participants' responses. For FINGER, the responses were recorded directly to disk and verified. The percentages of errors by condition and by age group are reported in Table 3.

Statistical analyses

First, a 3x2x2x4 ANCOVA was run using SPSS (IBM, version 22) to analyze performance (percentage of error by sequence), with three within-subject factors (Movement [SPEECH, MOUTH and FINGER], Complexity [simple, complex] and Modality [visual, auditory]), and one between-subject factor (Group [group 1, group 2, group 3 and group 4]). Two covariates were included in the statistical model (sex and the right PTA) to control for potential sex and hearing differences. Since a strong correlation was found between the right and the left PTA ($n = 80$, $r = 0.876$, $p = 0.000$), only the right PTA was included in the analyses to control for hearing sensitivity while avoiding over fitting the data. Significant effects revealed by the ANCOVA

were explored using FDR-corrected post hoc tests ([Benjamini & Hochberg, 1995](#); [Genovese, Lazar, & Nichols, 2002](#)) ($q = 0.05$, $i = 25$ tests).

Group	Group 1 (22-34 years)		Group 2 (37-54 years)		Group 3 (55-69 years)		Group 4 (70-93 years)	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
SPEECH auditory simple sequences	12.3	16.7	9.7	9.6	9.8	9.6	18.5	9.7
SPEECH auditory complex sequences	21.6	17.5	24.1	14.4	28.4	16.0	39.8	15.1
SPEECH visual simple sequences	12.5	11.3	10.4	9.6	18.0	18.6	36.0	21.7
SPEECH visual complex sequences	22.4	14.8	29.4	14.9	37.3	21.6	52.7	23.3
MOUTH auditory simple sequences	8.0	8.4	14.7	8.0	23.4	13.9	30.9	18.4
MOUTH auditory complex sequences	22.8	13.5	39.8	13.4	45.4	10.5	51.6	13.4
MOUTH visual simple sequences	3.7	2.7	6.3	8.5	12.3	10.9	17.2	12.7
MOUTH visual complex sequences	3.5	4.0	11.7	9.5	19.3	13.9	25.9	13.3
FINGER auditory simple sequences	0.9	1.2	0.8	1.3	0.9	1.6	1.4	1.8
FINGER auditory complex sequences	1.3	1.9	1.2	2.0	1.0	1.8	1.6	1.5
FINGER visual simple sequences	0.9	1.2	1.6	3.4	1.4	1.3	2.3	3.5
FINGER visual complex sequences	1.8	1.7	1.6	2.1	1.9	3.6	5.5	11.5

Table 3 : Mean accuracy (percentage of errors) and standard deviation for each condition and group

Results

Number of errors by sequence

The four-way ANCOVA conducted on the percentage of errors revealed significant main effects of Movement ($F_{(2,140)} = 6.288$, $p = 0.002$), Complexity ($F_{(1,70)} = 21.578$, $p < 0.001$) and Group ($F_{(3,70)} = 9.648$, $p < 0.001$). Interactions between Group and Movement ($F_{(6,140)} = 5.835$, $p < 0.001$), between Complexity and Group ($F_{(3,70)} = 7.675$, $p < 0.001$), between Movement and Modality ($F_{(2,140)} = 5.889$, $p = 0.004$), between Movement, Modality and Group ($F_{(6,140)} = 4.236$, $p = 0.001$), between Movement and Complexity ($F_{(2,140)} = 8.241$, $p < 0.001$), between Movement, Complexity and Group ($F_{(6,140)} = 3.184$, $p = 0.006$) and between Modality and Complexity ($F_{(1,70)} = 6.635$, $p = 0.012$) were also found. No effects of PTA or Sex were found.

As can be seen in Figure 3a, in general, participants were more accurate in producing simple than complex sequences ($t_{(75)} = -20.465$, $p < 0.001$). As shown in Figure 3b, with age, there was an overall increase in error rate. Post hoc tests revealed that the eldest participants (group 4) made more mistakes than all other groups. Performance in this group differed significantly from group 1 ($t_{(36)} = -6.584$, $p = 0.002$), group 2 ($t_{(33)} = -4.753$, $p < 0.001$) and group 3 ($t_{(37)} = -2.908$, $p = 0.009$). Group 1 also made significantly fewer mistakes than group 3 ($t_{(39)} = -3.732$, $p = 0.001$). Group 2 and group 3 did not differ from each other. The main effect of Movement is illustrated in Figure 4, which shows that participants made less mistakes during FINGER compared to SPEECH ($t_{(75)} = 12.855$, $p < 0.001$) and MOUTH ($t_{(75)} = 14.233$, $p < 0.001$).

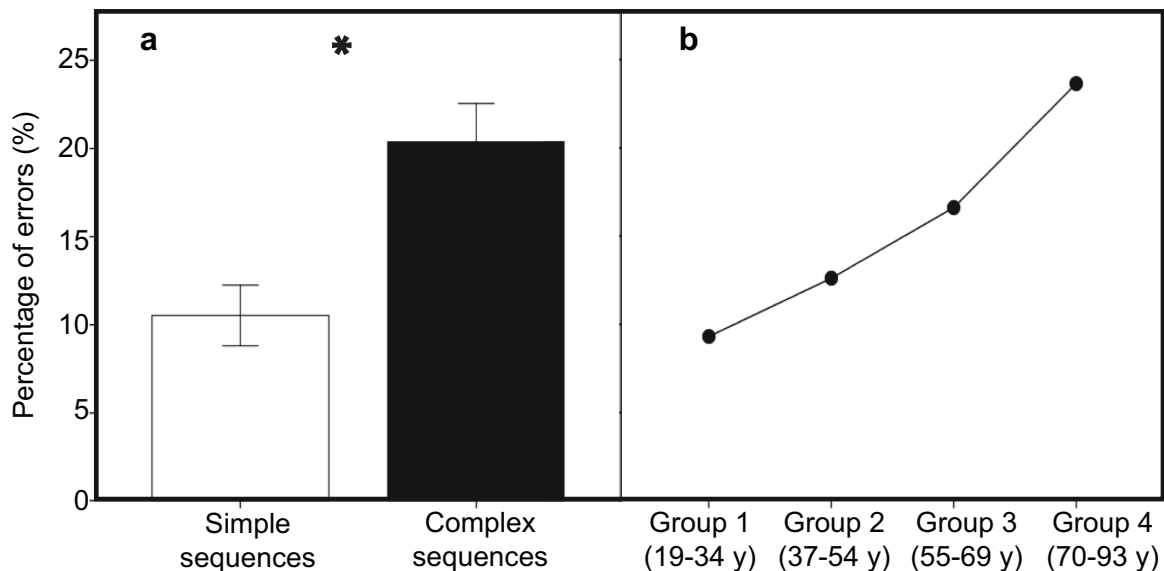


Figure 3 : Overall percentage of errors displayed as function of (a) sequence complexity (simple and complex), and (b) age group.

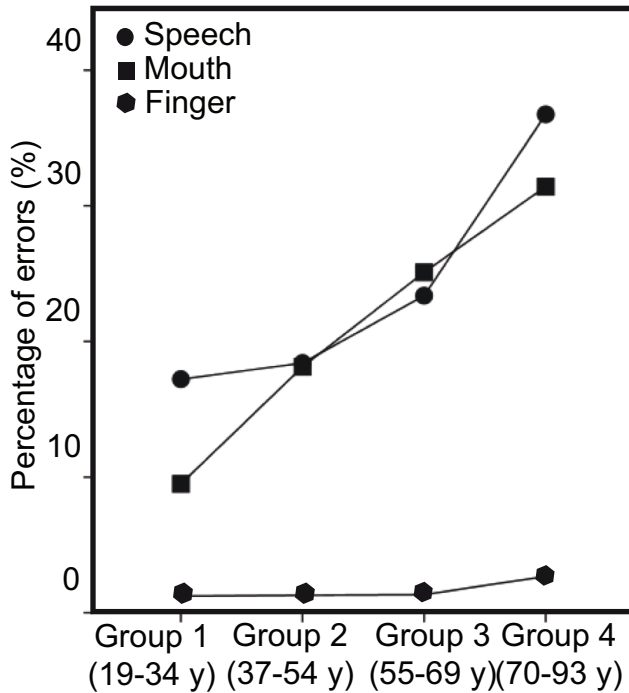


Figure 4 : Percentage of errors displayed as function of age group for each movement.

As shown in Figure 5, for the Modality by Movement interaction, post-hoc tests revealed that in the MOUTH condition, participants made more mistakes in the auditory modality than in the visual modality ($t_{(75)} = 12.500, p < 0.001$). In contrast, in the SPEECH and FINGER conditions, they made more mistakes in the visual than in the auditory modality (SPEECH: $t_{(75)} = -4.022, p < 0.001$; FINGER: $t_{(75)} = -2.216, p = 0.037$). For the 3-way interaction between Modality, Group and Movement, post-hoc tests revealed that, within each group, the direction of the stimulus Modality effect was different in the MOUTH compared to the SPEECH condition (group 1: $t_{(19)} = -3.582, p = 0.003$; group 2: $t_{(16)} = -5.796, p < 0.001$; group 3: $t_{(20)} = -6.034, p < 0.001$; group 4: $t_{(17)} = -6.926, p < 0.001$). The effect also differed between MOUTH and FINGER (group 1: $t_{(19)} = 5.551, p < 0.001$; group 2: $t_{(16)} = 8.507, p < 0.001$; group 3: $t_{(20)} = 5.448, p < 0.001$; group 4: $t_{(17)} = 7.076, p < 0.001$). The modality difference between FINGER and SPEECH was significant for group 3 ($t_{(20)} = -2.510, p = 0.027$) and group 4 ($t_{(17)} = -2.704, p = 0.021$). For the Modality by Complexity interaction, post-hoc tests revealed that for the complex sequences, participants made more mistakes in auditory than visual modality. There was no effect of modality for the simple sequences.

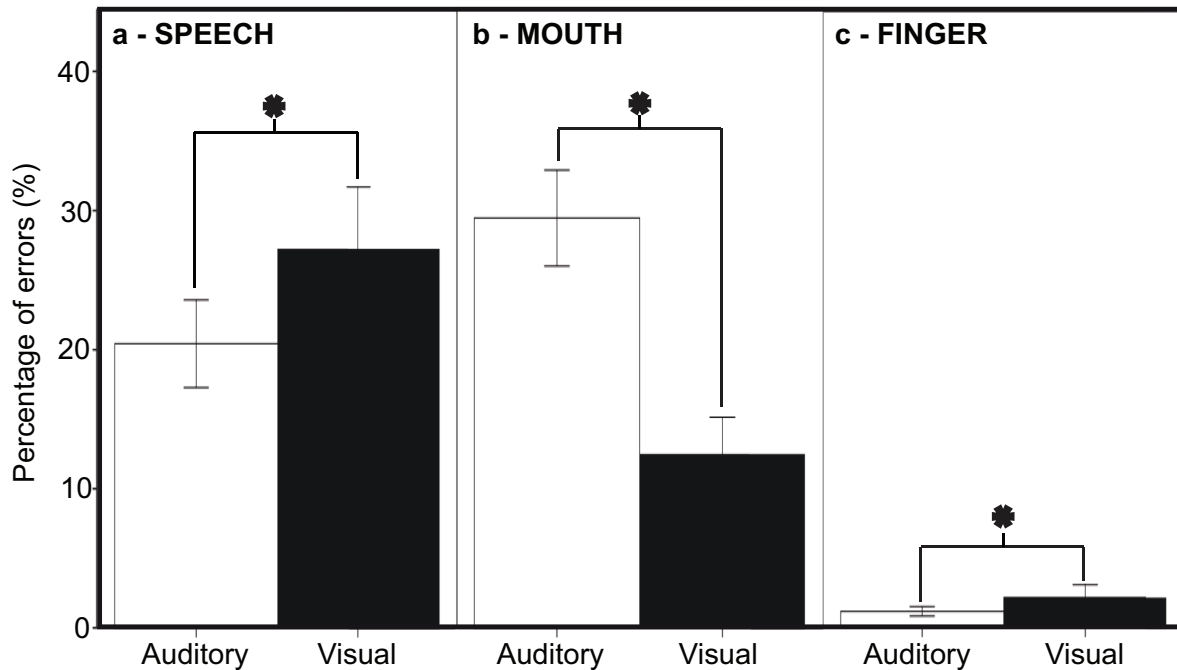


Figure 5 : Percentage of errors displayed as function of stimulus modality (visual or auditory) for each movement : (a) SPEECH, (b) MOUTH, and (c) FINGER. Asterisks indicate significant differences.

To decompose the 3-way interaction between Complexity, Group and Movement, a series of three additional 2x4 ANCOVAs were run, one for each type of movement, to examine age and sequence complexity effects within each movement type, with Complexity as a within subject factor and Group as a between subject factor. Two covariates were included in the statistical model (sex and the right PTA) to control for potential sex and hearing differences. As can be seen in Figure 6, these analyses revealed that Complexity effects were present in the SPEECH and MOUTH conditions but not in the FINGER condition. As show in Figure 7a, for SPEECH, the ANCOVA revealed a main effect of Complexity ($F_{(1,70)} = 18.596, p < 0.001$) and Group ($F_{(3,70)} = 5.928, p = 0.001$) and an interaction between Complexity and Group ($F_{(3,70)} = 6.049, p = 0.001$). Analysis revealed no effect of PTA or sex. FDR-corrected post hoc t-tests ([Benjamini & Hochberg, 1995](#); [Genovese et al., 2002](#)) ($q = 0.05; i = 10$) revealed that the difference between simple and complex sequences was significant for all groups (group 1: $t_{(19)} = -7.005, p < 0.001$; group 2: $t_{(16)} = -11.737, p < 0.001$; group 3: $t_{(20)} = -12.354, p < 0.001$; group 4: $t_{(17)} = -8.668, p < 0.001$). Moreover, the difference between simple and complex sequences was larger for group 2 ($t_{(35)} = 3.548, p = 0.002$), group 3 ($t_{(39)} = 4.508, p < 0.001$) and group 4 ($t_{(36)} = 3.711, p = 0.001$) compared to group 1.

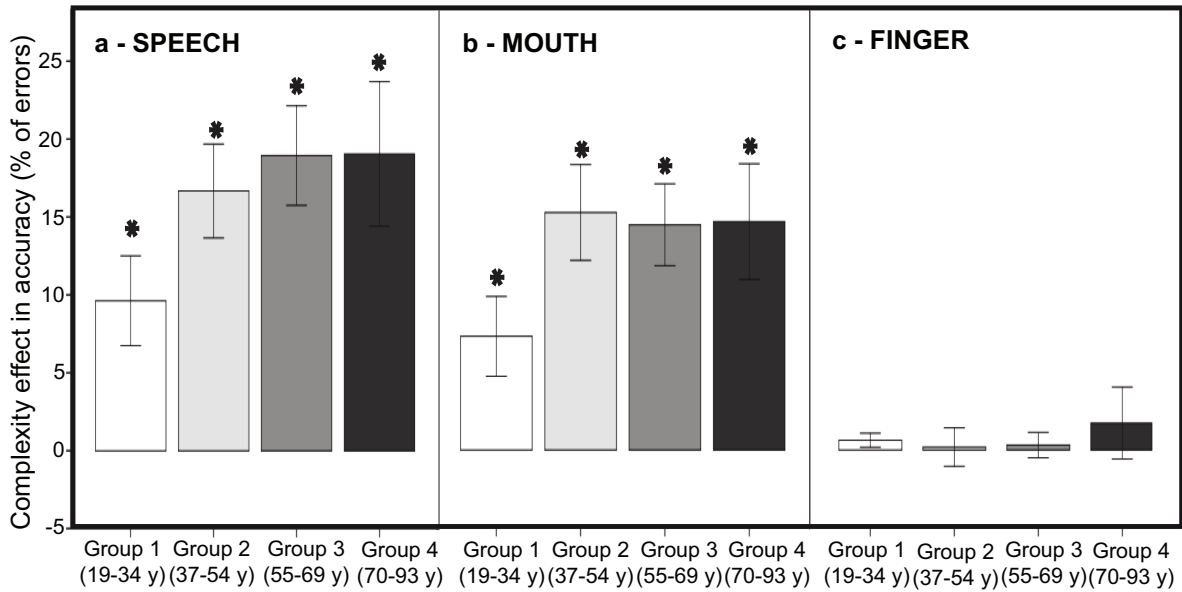


Figure 6 : Complexity effect ([percentage of errors for complex sequences] – [percentage of errors for simple sequences]) displayed as function of age group, separately for each movement : (a) SPEECH, (b) MOUTH, and (c) FINGER. Asterisks indicate significant differences.

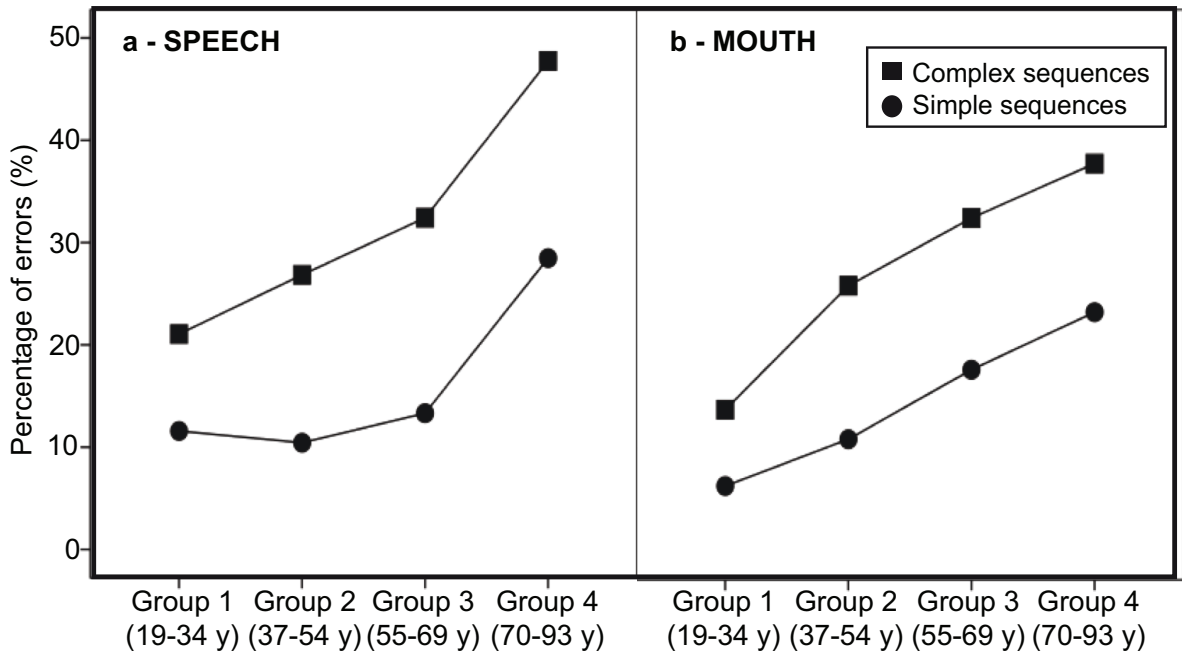


Figure 7 Percentage of errors for the simple and complex sequences displayed as of function age group for : (a) SPEECH, and (b) MOUTH

As shown in 7b, for MOUTH, the ANCOVA revealed a main effect of Complexity ($F_{(1,70)} = 19.075, p < 0.001$), and Group ($F_{(3,70)} = 11.764, p < 0.001$), and an interaction between Complexity and Group ($F_{(3,70)} = 5.868, p = 0.001$). No effects of PTA or sex were found. FDR-corrected post-hoc tests ($q = 0.05, i = 10$) (Benjamini & Hochberg, 1995; Genovese et al., 2002) revealed that the difference between simple and complex sequences was significant for all groups (Group 1: $t_{(20)} = -5.949, p < 0.001$; group 2: $t_{(16)} = -10.503, p < 0.001$; group 3: $t_{(20)} = -11.483, p < 0.001$; group 4: $t_{(17)} = -8.328, p < 0.001$). Moreover, the difference between simple and complex sequences was larger for group 2 ($t_{(35)} = 4.216, p < 0.001$), group 3 ($t_{(39)} = 4.071, p < 0.001$) and group 4 ($t_{(36)} = 3.489, p = 0.002$) compared to group 1.

For FINGER, the ANCOVA revealed an effect of right PTA ($F_{(1,70)} = 8.044, p = 0.006$) but no significant effect of complexity or age. Because we expected to find age effects on finger movements, we decided to explore the manual movements further by conducting additional analyses on reaction time (RT) and sequence duration in order to determine whether age affected finger movements in terms of timing rather than accuracy. For this analysis, we extracted RT and sequence durations only for the correct trials. Sequences that started before the response cue or that finished after the end of the trial were removed from the statistical analysis. Trials containing outliers, defined as values $\pm 2SD$ from the participant's mean, were also removed from the analysis. One participant was excluded from the duration and RT analysis because in the visual condition too many sequences (73%) were incorrect. Two separate $2 \times 2 \times 4$ ANCOVA were conducted on the resulting data, one for the RT and one for duration, with Complexity and Modality as the within-subject factors, and Group as the between-subject factor. For RT, the ANCOVA revealed significant main effects of Modality ($F_{(1,69)} = 4.130, p = 0.046$) and Complexity ($F_{(1,69)} = 6.7552, p = 0.011$) but no interaction. FDR-corrected post-hoc t-tests (Benjamini & Hochberg, 1995; Genovese et al., 2002) ($q = 0.05, i = 2$) revealed that participants were slower in visual than auditory condition ($t_{(74)} = -11.675, p < 0.001$). As shown in Figure 8b, in general, RT were shorter for simple compared to complex sequences ($t_{(74)} = -13.386, p < 0.001$).

For sequence duration, the ANCOVA revealed significant main effects of Complexity ($F_{(1,69)} = 4.945, p = 0.029$) and Group ($F_{(3,69)} = 4.670, p = 0.005$). Interactions between Complexity and Group ($F_{(3,69)} = 5.437, p = 0.002$) and between Complexity and Modality ($F_{(1,69)} = 4.182, p = 0.045$) were also found. FDR-corrected post-hoc t-tests (Benjamini & Hochberg, 1995; Genovese et al., 2002) ($q = 0.05, i = 12$) were conducted to explore these effects. As shown in Figure 8d, in general, simple sequences were shorter than complex sequences ($t_{(74)} = -7.935, p < 0.001$). As shown in Figure 8c, Post hoc tests revealed that the youngest participants (group 1) were faster than all other groups. Performance in this group differed significantly from group 2 ($t_{(35)} = -3.070, p = 0.006$), group 3 ($t_{(39)} = -3.255, p = 0.004$) and group 4 ($t_{(35)} = -3.680, p = 0.002$). For the Group by Complexity interaction, post-hoc tests revealed a complexity effect (complex > simple) in all groups except for group 1 (group 2: $t_{(16)} = -4.556, p = 0.001$; group 3: $t_{(20)} = -5.298, p < 0.001$; group 4: $t_{(16)} = -5.548, p < 0.001$). The

youngest participants showed no complexity effect on response duration. For the Modality by Complexity interaction, post-hoc tests revealed that the difference between simple sequences and complex sequences was larger in the visual condition than in auditory condition ($t_{(74)} = 5.261, p < 0.001$).

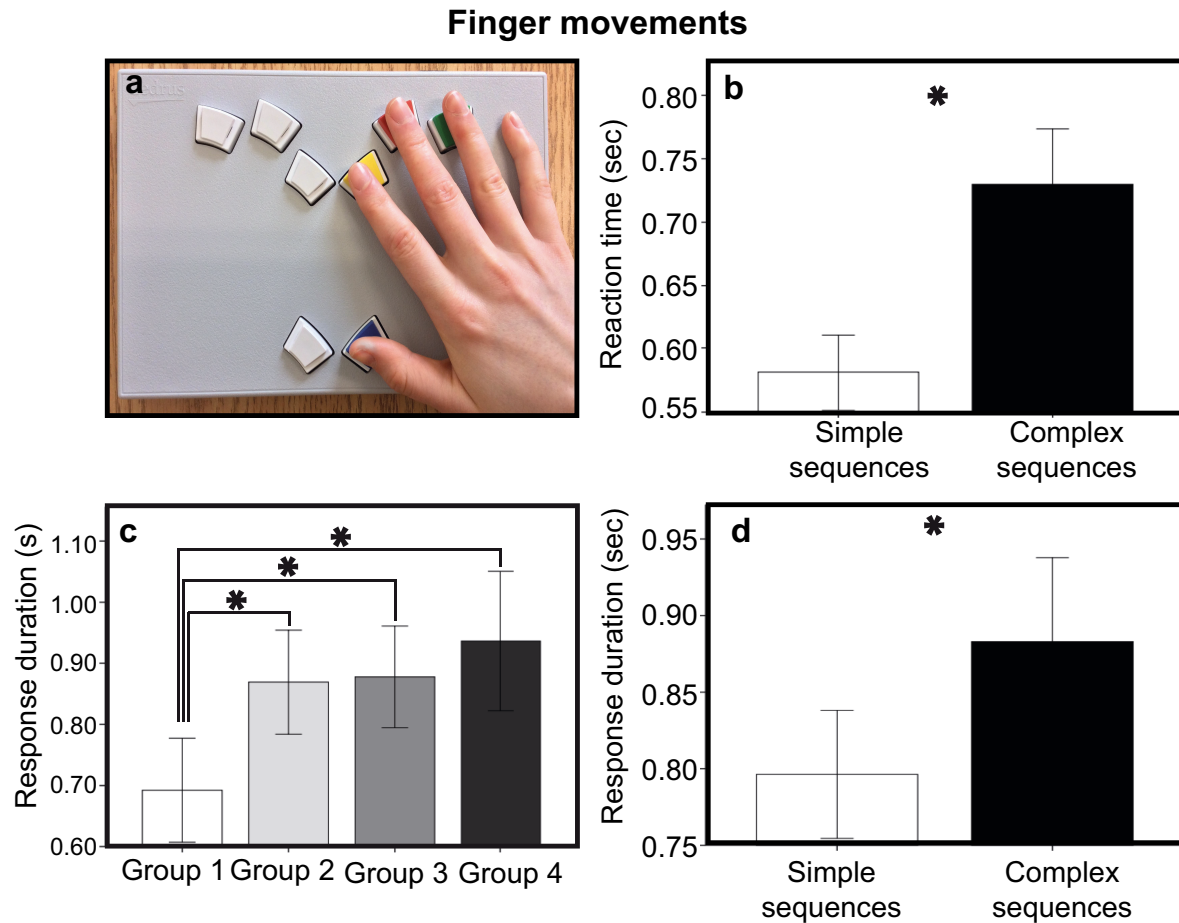


Figure 8 : (a) Position of the fingers on USB response pad (Cedrus, model models RB-830) during the FINGER task. The bar graphs illustrate the results for the additional analyses conducted on the finger movements. Asterisks indicate significant differences. (b) Reaction time as a function of complexity; (c) Response duration as function of age group; (d) Response duration as function of sequence complexity.

Discussion

The goal of the present study was to examine the effect of aging on the ability to produce sequences of fine motor actions (speech, oro-facial and manual movements) varying in complexity levels, while controlling for hearing, in healthy adults. Given the inherently sequential nature of speech, sequencing difficulties can be

particularly detrimental to communication efficiency in older ages. Despite the importance of communication in aging, the extent and underlying causes of articulatory and speech sequencing difficulties are still unknown, i.e. whether they are related to peripheral factors such as decreased oral muscle endurance, or to neurobiological factors such as less efficient neural mechanisms or structural damage to the brain regions involved in speech production. Here, we aimed at characterizing the extent of these difficulties using a behavioural approach and by conducting an analysis of errors. As was expected, an overall age-related performance decline was observed. When movements were examined separately, differences in the effect of aging and sequence complexity were found across movement types, with speech and oro-facial movements showing age-related accuracy decline but not finger movements. For finger movements, however, additional analyses revealed an increase in response duration with age. These findings are discussed in the following paragraphs.

Speech production

In the present study, we examined accuracy during a sequential speech production task in healthy young and older adults and we found a significant decrease in performance with age and, importantly, we found that this decline was stronger for complex sequences. From group 1 to 4, a ~55% decline was observed for the simple sequences and ~52% decline for the complex sequences. Several prior studies have shown a decline in speech rate with age ([Duchin & Mysak, 1987](#); [Fozo & Watson, 1998](#); [Ramig, 1983a](#); [Ryan, 1972](#); [Searl et al., 2002](#); [Wohlert & Smith, 1998](#)) but few study have examined accuracy and only a few have shown that older adults are less intelligible than younger adults ([Parnell & Amerman, 1987](#); [Shuey, 1989](#)). The present results demonstrate, for the first time, a decline in speech sequencing skills in healthy adults.

The underlying causes of the decline in speech skills with aging remain unknown. In previous studies of speech rate, the stimuli used were usually sentences or words; it is therefore possible that a decline in the efficiency of linguistic processing (e.g. syntax, lexical access, etc.) may account for the observed slowing, or at least for a part of it. In contrast, in the present study, we used meaningless syllable sequences and we still observed an age-related decline in accuracy, which suggests that the decline in efficiency of linguistic processes is not the only factor contributing to the observed decline of speech skills in aging. One possibility is that physiological changes in the oro-facial sphere could be contributing to the observed decline in accuracy. For example, it has been shown that older adults exhibit decreased oral tactile sensitivity ([Calhoun et al., 1992](#); [Wohlert, 1996c](#); [Wohlert & Smith, 1998](#)), as well as decreased lip strength ([Wohlert & Smith, 1998](#)), and decreased maximal tongue strength ([Neel & Palmer, 2012](#)). However, one study has shown that tongue

maximal strength is a poor predictor of articulation rate ([Neel & Palmer, 2012](#)), suggesting limited contribution of these physiological factors. Another, more likely possibility is that decline in speech accuracy is related to a decline in the neural planning and control of speech movements. Consistent with this hypothesis, recent studies from our group have shown important age-related changes in the structure and function of brain areas involved in speech motor control, including the premotor cortex and the supplementary motor area ([Bilodeau-Mercure, Lortie, Sato, Guitton, & Tremblay, 2014](#); [Tremblay, Dick, & Small, 2013](#)). Given the importance of communication in aging, and the fact that speaking is intrinsically a sequential behavior, further research is needed to better understand the cause of these sequencing difficulties. Moreover, further research needs to establish the range of these difficulties, and whether they are modulated by factors such as syllable complexity and syllable frequency. This is necessary to establish a more complete picture of the changes that the speech system undergoes with age and help design new interventions to remediate speech difficulties based on a better understanding of the specific articulatory difficulties faced by elderly adults.

Oro-facial movements

In the present study, we observed that older adults made significantly more mistakes than younger adults when they produced sequences of oro-facial movements. This effect was significantly stronger for the complex sequences. From group 1 to 4, a ~76% decline was observed for simple sequences and ~66% decline for complex sequences suggesting a decline in oro-facial motor control with aging. Very few studies have explored the production of oro-facial movements in aging. In one study, age-related changes in perioral reflex movement in response to innocuous mechanical stimulation of the lip vermillion have been reported ([Wohlert, 1996b](#)). In this study, older women (67-85 years) produced less reflexive responses to stimulation and their response had lower amplitude and longer latency than younger women (20-25 years). These changes in oral reflex movements can be due to physical changes like decreased lip strength ([Wohlert & Smith, 1998](#)), or decreased oral tactile sensitivity ([Calhoun et al., 1992](#); [Wohlert, 1996c](#); [Wohlert & Smith, 1998](#)). In the present study, these factors could be responsible for the performance decline that we observed. However, changes in motor planning and execution are also likely to play a role in the etiology of these age-related changes. Indeed, though performance decreased with an increase in complexity in all groups, we found that the effect of the complexity increased with age consistent with a decline in the neural control of movement planning.

The finding of a similar gradual decline in speech and oro-facial movements suggests a common underlying aging mechanism, not specific to speech movements. This aging process could be related to the

planning of movements involving the face and mouth or to the execution of these movements. Though only a few studies have examined the relationship between oro-facial movements and speech in adulthood and particularly in aging, a link between oro-facial movements and speech has been shown, consistent with the idea of shared mechanisms ([Alcock, 2006](#); [Alcock, Passingham, Watkins, & Vargha-Khadem, 2000](#); [Tremblay & Gracco, 2009, 2010b](#)). For example, some studies have shown that motor response selection involves similar neural resources for speech and oro-facial movements ([Tremblay & Gracco, 2009, 2010b](#)). Moreover, patients with speech impairments also have difficulty executing oro-facial movements ([Alcock, 2006](#); [Alcock et al., 2000](#)) suggesting shared mechanisms. In line with previous results, the present findings support the notion that speech and oro-facial movements engage common motor control mechanisms, including movement sequencing. Additional studies are needed to continue to explore the common and separate etiology of these changes, whether related to peripheral factors such as decreased oro-facial strength or sensibility, or to central factors such as motor planning, in particular motor sequencing.

Finger movements

In the present study, no effect of age or complexity was found on accuracy of finger movements. This finding was unexpected given that many studies have shown an age-related decline in the accuracy of manual movements ([Chaput & Proteau, 1996](#); [Christou & Enoka, 2011](#); [Goggin & Meeuwsen, 1992](#); [Pohl, Winstein, & Fisher, 1996](#); [Yan, Thomas, & Stelmach, 1998](#)). There are, however, several differences between the tasks used in these studies and the one that was used here. First, in the present study, only the fingers were used, whereas, in many other studies, participants performed more complex movements involving the whole arm ([Chaput & Proteau, 1996](#); [Goggin & Meeuwsen, 1992](#); [Pohl et al., 1996](#); [Yan et al., 1998](#)). Moreover, in our study, accuracy was measured as the number of correct movements produced (i.e. pressing with the correct finger); it was thus a simple dichotomous dependent variable with only two possible outcomes (correct/incorrect). In other studies, in contrast, accuracy was measured continuously in terms of movement precision ([Chaput & Proteau, 1996](#); [Christou & Enoka, 2011](#); [Goggin & Meeuwsen, 1992](#); [Pohl et al., 1996](#); [Yan et al., 1998](#)). For example, in a recent study, participants were asked to lift and lower light loads with their index finger and to stop their movements at a specific angle from the other fingers ([Christou & Enoka, 2011](#)). Older adults had more difficulty stopping their movement at the specified angle compared to the younger adults, though they could still stop the movement. It is possible that, should we have measured movement trajectories, we could have found age-related differences in movement precision in our task. Consistent with this hypothesis, we conducted additional analyses of the manual movements and we found age effects on response duration, consistent with the notion that, though globally accurate (i.e. on target), the finger

movements of older adults differed from those produced by younger adults. We also show that more complex sequences of finger movements are particularly affected by age in terms of response duration. These results are consistent with previous studies that found an effect of aging on the time required to produce sequences of movements ([Aoki & Fukuoka, 2010](#); [Cacola et al., 2013](#); [Cousins et al., 1998](#); [Ruiz et al., 2007](#)).

Taken together, our results suggest that, in a simple finger movement (button pressing) tasks, age effects affect duration more strongly than global accuracy. Indeed, the percentage of errors was very low across conditions. This may suggest that the orofacial tasks had a higher difficulty level compared to the finger movement task. The other possibility is that response accuracy declines more quickly in the oro-facial sphere than it does in the manual action sphere, perhaps due to the inherent complexity of speech movements, which require the coordination of several different muscles. Further studies are needed to replicate these findings, and determine the extent to which the aging of speech and oro-facial movements follows a different trajectory from that of finger movements.

Stimuli modality

In the present study, we observed that stimuli modality affected performance differently depending of the type of movement produced. For SPEECH and FINGER, participants were less accurate in the visual compared to the auditory condition. In contrast, for MOUTH, participants were less accurate in the auditory than in the visual modality. Participants reported having difficulty recognizing the sounds of the oro-facial movements. In day-to-day situations, these sounds usually occur in the presence of visual information (e.g. shape of the mouth, degree of opening) or other forms of contextual information including speech, such as listening to a kissing lip movement when saying goodbye to a loved one the phone. In contrast, people frequently listen to speech without visual information, for example, during phone conversations. This may explain the difficulty related to the auditory MOUTH condition. It is important to note that, since all analyses were corrected for hearing threshold, this effect cannot be attributed to a hearing decline otherwise it would have affected all movements equally. The present results suggest that the modality of the movement trigger differentially affect accuracy of oro-facial and speech movements in normal aging, which may have important implications for rehabilitation.

Conclusion

This study provides important new empirical evidence that orofacial motor control declines in cognitively healthy elderly adults (both males and females). These results suggest that the motor speech system undergoes significant decline over time that affect oro-facial movements. Here, we follow the general hypothesis that age-related speech difficulties, both perceptual and motor, have a multifactorial aetiology that includes central factors (such as speech motor planning), and possibly peripheral factors as well (such as tactile sensibility, decrease muscular endurance). Further studies are needed to continue explore the distinct impact of these different factors on the ability to communicate in aging. This is crucial since communication difficulties are considered to be of great importance by elderly adults ([Jacobs-Condit, 1984](#)). Indeed, these difficulties often lead to social participation that is less diverse, more restricted to home settings, and involves fewer relationships ([Law, 2002](#)). It is therefore important that we gain a better understand of the extent to which age affects speech production and its underlying mechanisms, to be able to detect and remediate these important health issues.

Acknowledgments

This work was supported by grants from the Fonds Québécois de le Recherche – Société et Culture (FRQ-SC) and from the Fonds Québécois de le Recherche – Santé (FRQ-S) to P.T. and by a start-up grant from the Institut Universitaire en Santé Mentale de Québec (IUSMQ) to P.T. These sponsors played no role in the design, execution, analysis and interpretation of data, or writing of the study. We thank Isabelle Deschamps for her comments on previous versions of this manuscript.

References

- Alcock K (2006) The development of oral motor control and language Down's syndrome, research and practice : the journal of the Sarah Duffen Centre / University of Portsmouth 11:1-8
- Alcock KJ, Passingham RE, Watkins KE, Vargha-Khadem F (2000) Oral dyspraxia in inherited speech and language impairment and acquired dysphasia *Brain and language* 75:17-33 doi:10.1006/brln.2000.2322
- Aoki T, Fukuoka Y (2010) Finger tapping ability in healthy elderly and young adults *Medicine and science in sports and exercise* 42:449-455 doi:10.1249/MSS.0b013e3181b7f3e1
- Baker KK, Ramig LO, Sapir S, Luschei ES, Smith ME (2001) Control of vocal loudness in young and old adults *Journal of speech, language, and hearing research : JSLHR* 44:297-305
- Benjamini Y, Hochberg Y (1995) Controlling the False Discovery Rate: a Practical and Powerful Approach to Multiple Testing *Journal of the Royal Statistical Society Series B (Methodological)* 57:289-300
- Bilodeau-Mercure M, Lortie CL, Sato M, Guitton MJ, Tremblay P (2014) The neurobiology of speech perception decline in aging *Brain structure & function* doi:10.1007/s00429-013-0695-3
- Cacola P, Roberson J, Gabbard C (2013) Aging in movement representations for sequential finger movements: a comparison between young-, middle-aged, and older adults *Brain and cognition* 82:1-5 doi:10.1016/j.bandc.2013.02.003
- Calhoun KH, Gibson B, Hartley L, Minton J, Hokanson JA (1992) Age-related changes in oral sensation *The Laryngoscope* 102:109-116 doi:10.1288/00005537-199202000-00001
- Chaput S, Proteau L (1996) Aging and motor control *The journals of gerontology Series B, Psychological sciences and social sciences* 51:P346-355
- Christou EA, Enoka RM (2011) Aging and movement errors when lifting and lowering light loads *Age (Dordrecht, Netherlands)* 33:393-407 doi:10.1007/s11357-010-9190-4
- Cousins MS, Corrow C, Finn M, Salamone JD (1998) Temporal measures of human finger tapping: effects of age *Pharmacology, biochemistry, and behavior* 59:445-449
- D'Haeseleer E, Depypere H, Claeys S, Wuyts FL, Baudonck N, Van Lierde KM (2011) Vocal characteristics of middle-aged premenopausal women *Journal of voice : official journal of the Voice Foundation* 25:360-366 doi:10.1016/j.jvoice.2009.10.016
- Decoster W, Debruyne F (1997) The ageing voice: changes in fundamental frequency, waveform stability and spectrum *Acta oto-rhino-laryngologica Belgica* 51:105-112
- Duchin SW, Mysak ED (1987) Disfluency and rate characteristics of young adult, middle-aged, and older males *Journal of communication disorders* 20:245-257
- Fozo MS, Watson BC (1998) Task complexity effect on vocal reaction time in aged speakers *Journal of voice : official journal of the Voice Foundation* 12:404-414

Genovese CR, Lazar NA, Nichols T (2002) Thresholding of Statistical Maps in Functional Neuroimaging Using the False Discovery Rate *NeuroImage* 15:870-878 doi:<http://dx.doi.org/10.1006/nimg.2001.1037>

Gentilucci M (2003) Grasp observation influences speech production *The European journal of neuroscience* 17:179-184

Gentilucci M, Dalla Volta R, Gianelli C (2008) When the hands speak *Journal of physiology, Paris* 102:21-30 doi:10.1016/j.jphysparis.2008.03.002

Goggin NL, Meeuwssen HJ (1992) Age-related differences in the control of spatial aiming movements *Research quarterly for exercise and sport* 63:366-372 doi:10.1080/02701367.1992.10608758

Honjo I, Isshiki N (1980) Laryngoscopic and voice characteristics of aged persons *Archives of otolaryngology (Chicago, Ill : 1960)* 106:149-150

Hunter EJ, Kapsner-Smith M, Pead P, Engar MZ, Brown WR (2012) Age and speech production: a 50-year longitudinal study *Journal of the American Geriatrics Society* 60:1175-1177 doi:10.1111/j.1532-5415.2012.03983.x

Jacobs-Condit LE (1984) *Gerontology and Communication Disorders*. American Speech-Language-Hearing Association, Rockville

Jimenez-Jimenez FJ et al. (2011) Influence of age and gender in motor performance in healthy subjects *Journal of the neurological sciences* 302:72-80 doi:10.1016/j.jns.2010.11.021

Kent RD (2000) Research on speech motor control and its disorders: a review and prospective *J Commun Disord* 33:391-427; quiz 428 doi:S0021-9924(00)00023-X [pii]

Kent RD, Kent JF, Rosenbek JC (1987) Maximum performance tests of speech production *The Journal of speech and hearing disorders* 52:367-387

Law M (2002) Participation in the occupations of everyday life *The American journal of occupational therapy : official publication of the American Occupational Therapy Association* 56:640-649

Linville SE (1996) The sound of senescence *Journal of voice : official journal of the Voice Foundation* 10:190-200

Morris R, Brown WS (1987) Age-related voice measures among adult women *Journal of voice* 1:43

Mueller PB (1997) The aging voice *Seminars in speech and language* 18:159-168; quiz 168-159 doi:10.1055/s-2008-1064070

Nasreddine ZS, Chertkow H, Phillips N, Bergman H, Whitehead V (2003) Sensitivity and Specificity of The Montreal Cognitive Assessment (MoCA) for Detection of Mild Cognitive Deficits *Can J Neurol Sci* 30

Neel AT, Palmer PM (2012) Is tongue strength an important influence on rate of articulation in diadochokinetic and reading tasks? *Journal of speech, language, and hearing research : JSLHR* 55:235-246 doi:10.1044/1092-4388(2011/10-0258)

Oldfield RC (1971) The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory *Neuropsychologia* 9:97-113

Parnell MM, Amerman JD (1987) Perception of oral diadochokinetic performances in elderly adults *Journal of communication disorders* 20:339-351

Pohl PS, Winstein CJ, Fisher BE (1996) The locus of age-related movement slowing: sensory processing in continuous goal-directed aiming *The journals of gerontology Series B, Psychological sciences and social sciences* 51:P94-102

Ramig LA (1983a) Effects of physiological aging on speaking and reading rates *Journal of communication disorders* 16:217-226

Ramig LA (1983b) Effects of physiological aging on vowel spectral noise *Journal of gerontology* 38:223-225

Ruiz PJ, Bernardos VS, Bartolome M, Torres AG (2007) Caput timed tests quantify age-related motor decline in normal subjects *Journal of the neurological sciences* 260:283-285 doi:10.1016/j.jns.2007.04.034

Ryan WJ (1972) Acoustic aspects of the aging voice *Journal of gerontology* 27:265-268

Ryan WJ, Burk KW (1974) Perceptual and acoustic correlates of aging in the speech of males *Journal of communication disorders* 7:181-192

Searl JP, Gabel RM, Fulks JS (2002) Speech disfluency in centenarians *Journal of communication disorders* 35:383-392

Shuey EM (1989) Intelligibility of older versus younger adults' CVC productions *Journal of communication disorders* 22:437-444

Smith BL, Wasowicz J, Preston J (1987) Temporal characteristics of the speech of normal elderly adults *Journal of speech and hearing research* 30:522-529

Stach BA (2010) *Clinical Audiology: An Introduction*. Delmar, Clifton Park, NY, USA

Tremblay P, Dick AS, Small SL (2013) Functional and structural aging of the speech sensorimotor neural system: functional magnetic resonance imaging evidence *Neurobiology of aging* 34:1935-1951 doi:10.1016/j.neurobiolaging.2013.02.004

Tremblay P, Gracco VL (2009) Contribution of the pre-SMA to the production of words and non-speech oral motor gestures, as revealed by repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS) *Brain research* 1268:112-124 doi:10.1016/j.brainres.2009.02.076

Tremblay P, Gracco VL (2010) On the selection of words and oral motor responses: evidence of a response-independent fronto-parietal network *Cortex* 46:15-28 doi:10.1016/j.cortex.2009.03.003

Tremblay P, Shiller DM, Gracco VL (2008) On the time-course and frequency selectivity of the EEG for different modes of response selection: evidence from speech production and keyboard pressing *Clinical neurophysiology : official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology* 119:88-99

Wilcox KA, Horii Y (1980) Age and changes in vocal jitter *Journal of gerontology* 35:194-198

Wohlert AB (1996a) Reflex responses of lip muscles in young and older women *Journal of speech and hearing research* 39:578-589

Wohlert AB (1996b) Tactile perception of spatial stimuli on the lip surface by young and older adults *Journal of speech and hearing research* 39:1191-1198

Wohlert AB, Smith A (1998) Spatiotemporal stability of lip movements in older adult speakers *Journal of speech, language, and hearing research : JSLHR* 41:41-50

Yan JH, Thomas JR, Stelmach GE (1998) Aging and rapid aiming arm movement control *Experimental aging research* 24:155-168 doi:10.1080/036107398244292

Yesavage JA, Brink TL, Rose TL, Lum O, Huang V, Adey M, Leirer VO (1982) Development and validation of a geriatric depression screening scale: a preliminary report *Journal of psychiatric research* 17:37-49

3 Étude 2 Impact of aging on sequential speech production : articulatory and physiological factors

Running title: Factors of difficulty in speech production in aging

Authors: Bilodeau-Mercure, Mylène¹, and Tremblay, Pascale^{1,2}

1. Centre de Recherche de l'Institut Universitaire en Santé Mentale de Québec, 2601 de la canardière, Québec City, QC, Canada
2. Département de Réadaptation, Faculté de Médecine, Université Laval, Québec City, QC, Canada

Submitted to Journal of the American Geriatrics Society

Résumé : Le but de cette étude était d'explorer l'impact de facteurs linguistiques (la complexité séquentielle et la résonance nasale) et du déclin physiologique dans la sphère oro-faciale sur la production de la parole dans le vieillissement. 15 jeunes adultes (18-39 ans) et 15 aînés (66-85 ans) ont produit des séquences de syllabes. Dans cette tâche, les séquences étaient composées d'une, deux ou trois syllabes différentes (complexité séquentielle) et étaient composées de syllabes contenant seulement des voyelles orales, des voyelles nasales ou les deux types de voyelles. Le pourcentage d'erreur et le débit ont été calculés. La sensibilité, la force et l'endurance de la langue et des lèvres de chaque participant ont été évaluées. Les résultats démontrent que les voyelles nasales sont particulièrement difficiles pour les aînés. De plus, une analyse de médiation a révélé que le déclin de l'endurance des lèvres est associé avec une augmentation du pourcentage d'erreur.

Abstract : The aim of this study was to explore, for the first time, the impact of linguistic factors (sequential complexity and nasal resonance) and oro-facial physiological decline on speech production in aging. 15 cognitively healthy older adults (66-85 years old) and 15 young adults (18-39 years old) completed a task involving the production of sequence of syllables (Diadochokinesis or DDK). For this task, sequences were composed of one, two or three different syllables (sequential complexity) and were either composed of syllables containing only oral vowels, only nasal vowels or both (nasal resonance). The percentage of errors and speech rate were calculated. For each participant, measures of lip and tongue strength, endurance and sensibility were obtained. Results show that nasal vowels are particularly difficult for older adults. Furthermore, mediation analysis revealed that age-related decrease in lip endurance is associated with an increase in the percentage of errors during the DDK task.

INTRODUCTION

Speech is a complex, intrinsically sequential, behaviour that require fine motor control over dozens of muscles located in the face, neck and abdomen. The ability to produce sequential speech movements undergoes important changes with age. Several studies have shown a decrease in speech rate when older adults produce sentences ([Dromey et al., 2014](#); [Ryan, 1972](#); [Smith et al., 1987](#)), words ([Smith et al., 1987](#)) or non-words ([Sadagopan & Smith, 2013](#); [Tremblay & Deschamps, Revisions submitted](#)). In terms of accuracy however, results have been less consistent. No significant age differences were found in speech errors during the slow production of tongue twisters ([Vousden & Maylor, 2006](#)) and during the production of sequences of visually triggered syllables ([Tremblay & Deschamps, Revisions submitted](#)). In contrast, older adults are significantly more often misunderstood when they produce words embedded in a carrier phrase ([Shuey, 1989](#)) and have been rated as less intelligible by speech-pathologists when repeating syllables rapidly ([Parnell & Amerman, 1987](#)), suggesting an age-related decline in articulatory precision. However, older adults were not rated as less intelligible when they read aloud a standardized passage, a task that is more natural than syllable repetition ([Amerman & Parnell, 1990](#)). The inconsistency across studies may be explained by differences in the complexity of the speech tasks that have been used. Indeed, an age-related decline in accuracy has been shown for the production of long non-words but not for shorter non-words ([Sadagopan & Smith, 2013](#)), and for the production of complex sequences of syllables compared to simpler sequences ([Bilodeau-Mercure et al., In press](#)). It is also possible that certain speech sounds or sequences of sounds are particularly difficult for older adults to produce, though, to our knowledge, no study thus far has compared age-related difficulty associated with the production of specific sounds.

While most studies have focused on the production of oral sounds, it is possible that the production of nasal sounds, which requires a fine control over the velum and the coordination of velar movements with tongue and lips movements, is particularly vulnerable to age. Some studies have shown higher nasalance (i.e. a comparison between nasally and orally emitted acoustic energy) for older adults ([D'Haeseleer, Depypere, Claeys, & Van Lierde, 2011](#); [Seaver et al., 1991](#)), suggesting a decrease in the ability to control velar movements. However, other studies have shown no aged-related change in this measure ([Hutchinson et al., 1978](#); [Rochet et al., 1998](#)), in nasal resonance as measured by nasal air flow ([Hoit et al., 1994](#)) or when rated by speech-language pathologists ([Amerman & Parnell, 1990](#)). It therefore remains unclear whether the production of nasal sounds is particularly vulnerable to aging. Physiological decline in the oro-facial sphere may also have an impact on speech production. It has been shown that older adults exhibit decreased oral tactile sensitivity ([Calhoun et al., 1992](#); [Heft & Robinson, 2010](#); [Wohlert & Smith, 1998](#)), as well as decreased lip strength ([Wohlert & Smith, 1998](#)), and decreased maximal tongue strength ([Crow & Ship, 1996](#); [Neel & Palmer, 2012](#); [Vanderwegen et al., 2013](#)). However, the relationship between physiological changes and

speech production has never been tested. The aim of this study was therefore to explore, for the first time, the impact of motor complexity and oro-facial physiological decline on speech production in aging. Our hypothesis was that the production of sequences containing different syllables (sequential complexity) and the production of sequences containing both nasal and oral vowels (articulatory complexity) would be more difficult to produce for older compared to younger adults reflecting a decline in speech motor control, consistent with our previous work ([Bilodeau-Mercure et al., In press](#); [Tremblay & Deschamps, Revisions submitted](#)). We also expected that a decline in lip and tongue endurance and tactile sensitivity would negatively impact speech production performance in older adults.

METHODS

Participant

15 healthy young adults (mean age 27.7 ± 6.8 ; nine females) and 15 healthy older adults (mean age 73.9 ± 6.1 ; seven females) were included in this study. Four additional participants were originally recruited, but were excluded either because they failed the Geriatric Depression Scale (three young adults) or reported a diagnosed neuropsychological condition (one older adult). All participants were native speakers of Canadian French, had normal or corrected-to-normal vision and no self-reported speech, voice, language, swallowing, psychological, neurological or neurodegenerative disorder, no severe respiratory disorder and all were non-smokers. Participants were screened for depression using the Geriatric Depression Scale ([Yesavage et al., 1982](#)) and their cognitive level was assessed using the Montreal Cognitive Assessment scale (MOCA) ([Nasreddine et al., 2003](#)). Because it has been suggested that a cut-off score of <26 for the MOCA may lead to false positives (i.e. classifying neurologically intact individuals as having a mild cognitive impairment) ([Waldron-Perrine & Axelrod, 2012](#)), in the present study, we included participants who scored 23 and more on the MOCA. All participants had normal to mild hearing loss for standard pure tone average (PTA: average of threshold at .5, 1 and 2 kHz) of each ear as measured using a clinical audiometer (AC40, Interacoustic). Participants' characteristics are reported in Table 1. The study was approved by the Institutional Ethical Committee of the Institut Universitaire en Santé Mentale de Québec (#352-2013).

Table 1. Participants' characteristics by age group

	Young adults (18-39 year, n=15, 9 females)				Older adults (66-85 years, n=15, 7 females)			
	Min.	Max.	Mean	SD	Min.	Max.	Mean	SD
Age	18	39	27.7	6.8	66	85	73.9	6.1
Education (years)	12	21	16.9	2.7	10	22	15.1	3.6
MOCA (max. score 30)	25	30	28.667	1.175	25	29	27.067	14.864
Depression scale (max. score 30)	0	8	2.133	2.066	0	4	1.667	1.589
Handedness (max. score 20)	-18	20	9.133	14.035	-10	20	16.800	7.839
Right ear PTA (dB)	-6	28.67	5.84	8.57	-0.33	31.33	13.62	8.37
Left ear PTA (dB)	-3.67	12.33	2.51	5.44	1	24.33	13.07	8.19

Table 4 : Participants' characteristics by age group (ÉTUDE 2)**Physiological measures**

We examined tactile sensitivity of lips and tongue using a standard two-point discrimination procedure (Discriminator, Jamar) to find ascending and descending limits of discrimination ([Heft & Robinson, 2010](#)). Strength of the tongue and lips were measured using the Iowa Oral Performance Instrument (IOPI MEDICAL LLC) ([Crow & Ship, 1996](#); [Neel & Palmer, 2012](#); [Vanderwegen et al., 2013](#); [Vitorino, 2010](#); [Wohlert & Smith, 1998](#)). The maximum strength over three trials was noted. For endurance, participants were asked to squeeze the bulb of the IOPI at 50% of their maximum strength, indicated by a green light on the device, for as long as possible. If the participants could not maintain the pressure for at least two seconds, the trial was stopped and the time was noted. Data is missing for two young participants because they could not maintain a constant pressure.

Speech task (diadochokinesis or DDK)

Participants were seated in a double-walled sound attenuated room. Following a short practice session, syllables were presented visually on a screen placed in front of them. After 1500 ms, the color of the syllables changed from red to green indicating the start of the trial, which lasted for 5000 msec. Participants' task was to repeat the syllables as many times as possible while trying to minimize articulation errors. Inter-trial intervals ranged from 2000 to 3000 ms. Participants' responses were recorded using a high quality multidirectional microphone. Facial electromyographic activity (EMG) was recorded during the speech task but the data will not be reported here. The syllables were manipulated in terms of sequential and articulatory complexity (Resonance). For Sequential complexity, the stimuli were SIMPLE (e.g. /pa/), INTERMEDIATE (containing two different movements, e.g. /pa ta/) or COMPLEX (containing three different movements e.g. /pa ta ka/). For Resonance, the sequences were either composed of syllables containing only oral vowels (e.g. /pa/) (ORAL), only nasal vowels (e.g. /pã/) (NASAL condition) or both (e.g. / do tã /) (MIXED condition). A complete list of stimuli is presented in Table 4. The order of trials was randomized and was the same for all participants. In total, participants completed 96 trials, with 12 trials per condition.

	SIMPLE		INTERMEDIATE		COMPLEX	
	STIMULI	IPA	STIMULI	IPA	STIMULI	IPA
ORAL	PA	/pa/	PA TA	/pa ta/	KA PA TA	/ka pa ta/
	TA	/ta/	KO PO	/ko po/	TO PO KO	/to po ko/
	KA	/ka/	TO PA	/to pa/	TA KA PO	/ta ka po/
	PO	/po/	TA KO	/ta ko/	PA TO KA	/pa to ka/
	TO	/to/	BA DA	/ba da/	BO DO GO	/bo do go/
	KO	/ko/	GO DO	/go do/	BA DA GA	/ba da ga/
	BA	/ba/	DA BO	/da bo/	DO GA BA	/do ga ba/
	DA	/da/	BO GA	/bo ga/	GO BO DA	/go bo da/
	GA	/ga/	KA BA	/ka ba/	KO BO DO	/ko bo do/
	BO	/bo/	DO TO	/do to/	GA TA PA	/ga ta pa/
	DO	/do/	PO GA	/po ga/	DA GO KO	/da go ko/
	GO	/go/	GO KA	/go ka/	PO BA TO	/po ba to/
NASAL	PAN	/pã/	TON KON	/tõ kõ/	TON KON PON	/tõ kõ põ/
	TAN	/tã/	TAN KAN	/tã kã/	TAN KAN PAN	/tã kã pã/
	KAN	/kã/	PON TAN	/põ tã/	PAN TON KON	/pã tõ kõ/
	PON	/põ/	KAN TON	/kã tõ/	KON TAN PAN	/kõ tã pã/
	TON	/tõ/	GON BON	/gõ bõ/	GON DON BON	/gõ dõ bõ/
	KON	/kõ/	GAN BAN	/gã bã/	GAN BAN DAN	/gã bã dã/
	BAN	/bã/	BAN GON	/bã gõ/	DON GAN BAN	/dõ gã bã/
	DAN	/dã/	BON GAN	/bõ gã/	BAN GON DAN	/bã gõ dã/
	GAN	/gã/	DON PON	/dõ põ/	DAN PAN TAN	/dã pã tã/
	BON	/bõ/	DAN PAN	/dã pã/	BON PON TON	/bõ põ tõ/
	DON	/dõ/	KON DAN	/kõ dã/	KAN BON GON	/kã bõ gõ/
	GON	/gõ/	PAN DON	/pã dõ/	PON GAN DON	/põ gã dõ/
MIXED			PO KON	/po kõ/	KO PON TON	/ko põ tõ/
			TA KAN	/ta kã/	KA TAN PAN	/ka tã pã/
			TO PAN	/to pã/	PO KAN TAN	/po kã tã/
			KA TON	/ka tõ/	PA TO KAN	/pa to kã/
			GO DON	/go dõ/	GO DON BON	/go dõ bõ/
			GA DAN	/ga dã/	BA DO GON	/ba do gõ/
			DA BON	/da bõ/	GA BO DAN	/ga bo dã/
			BA GON	/ba gõ/	DO BA GAN	/do ba gã/
			BO PON	/bo põ/	TO BON PON	/to bõ põ/
		PA GAN	/pa gã/	DA KA BAN	/da ka bã/	

Table 5 : Stimuli

Behavioural analysis

Two judges listened and transcribed all sequences (M.B.M. and a research assistant). When the two transcriptions differed, a third judge (a second research assistant) transcribed the sequence to reach an inter-judges agreement of 2/3. Data analyses focused on the percentage of errors per trial (number of incorrect syllables divided by total number of syllables produced) and speech rate (total number of syllables produced / five seconds). Errors included misses, sound exchanges, production of additional syllables and the production of unintelligible syllables. Only syllables produced within the first five seconds were included in the analysis.

Statistical analyses

Speech task

Statistical analyses were conducted using SPSS 22 (IBM). First, two separate mixed model 3x2x2 ANCOVAs were run to analyze the percentage of errors and speech rate with two within-subject factors (Resonance [ORAL, NASAL and MIXED] and Sequence complexity [INTERMEDIATE, COMPLEX]) and one between-subject factor (Group [Young and Older]). Because the MIXED condition comprised only INTERMEDIATE and COMPLEX trials, SIMPLE trials were not included in these first analyses. Next, two additional 3x2 ANCOVAs were conducted to analyze the percentage of errors and speech rate, with one within-subject factors (Sequence complexity [SIMPLE, INTERMEDIATE and COMPLEX]) and one between-subject factor (Group). Finally, because the effect of Resonance in the SIMPLE condition could not be analyzed through these analyses, two additional 2x2 ANCOVAs were conducted to analyze the percentage of errors and speech rate in the SIMPLE condition with one within-subject factors (Resonance [ORAL and NASAL]) and one between-subject factor (Group).

Physiological measures

For physiological measures (strength, endurance and sensitivity of the lips and tongue), unilateral t-tests were used to compare groups. To examine whether age-related changes in speech production performance were mediated by physiological changes, mediations analyses were conducted using the PROCESS macro for SPSS (<http://www.afhayes.com/>) ([Hayes, 2013](#); [Preacher & Hayes, 2004](#)). Mediation analyses allow researchers to examine the mechanisms by which one variable affects another ([Bilodeau-Mercure, Lortie,](#)

[Sato, Guitton, & Tremblay, 2015](#); [Preacher & Hayes, 2004](#); [Tremblay & Deschamps, Revisions submitted](#)). In our model, illustrated in Figure 12d, the dependent (Y) variable was the performance (speech rate and accuracy), the independent (X) variable was the categorical variable Age (Young, Older) and the mediators (M) were the strength and endurance of the lips and tongue, and the sensitivity of lips. Sensitivity of the tongue was not used as a mediator in these analyses because its distribution was dichotomous rather than continuous. Sex was included as a covariate for both the mediator (M) and the dependent variable (Y) models.

RESULTS

Speech task

The 2x2x3 ANCOVA (Group X Sequence complexity X Resonance) conducted on the percentage of errors revealed a significant main effects of Sequence complexity ($F_{(1,28)} = 8.850, \rho = 0.006$) and Resonance ($F_{(2,56)} = 9.863, \rho < 0.001$) and interactions between Group and Resonance ($F_{(2,56)} = 4.037, \rho = 0.023$) and between Sequence complexity and Resonance ($F_{(2,56)} = 3.397, \rho = 0.041$), but no three-way interaction. In general, participants were more accurate in producing ORAL than NASAL ($t_{(29)} = -3.165, \rho = 0.004$) and MIXED sequences ($t_{(29)} = -2.902, \rho = 0.007$). Participants were also more accurate in producing MIXED than NASAL sequences ($t_{(29)} = -2.537, \rho = 0.017$). As can be seen in Figure 10a, the difficulty with the NASAL sequences was found only for the older participants, who were less accurate in producing NASAL compared to ORAL ($t_{(14)} = -2.809, \rho = 0.014$) and MIXED sequence ($t_{(14)} = 3.067, \rho = 0.008$). The younger adults, in contrasts, were less accurate in producing MIXED compared to ORAL ($t_{(14)} = -2.295, \rho = 0.038$), but not NASAL sequences. In general, participants were more accurate in producing INTERMEDIATE than COMPLEX sequences ($t_{(29)} = 2.994, \rho = 0.006$). Furthermore, as can be seen in Figure 3, post-hoc tests for the Sequence complexity by Resonance interaction revealed that the difference in performance between INTERMEDIATE and COMPLEX was significant for NASAL sequences ($t_{(29)} = -2.829, \rho = 0.008$) but not for the ORAL and MIXED sequences.

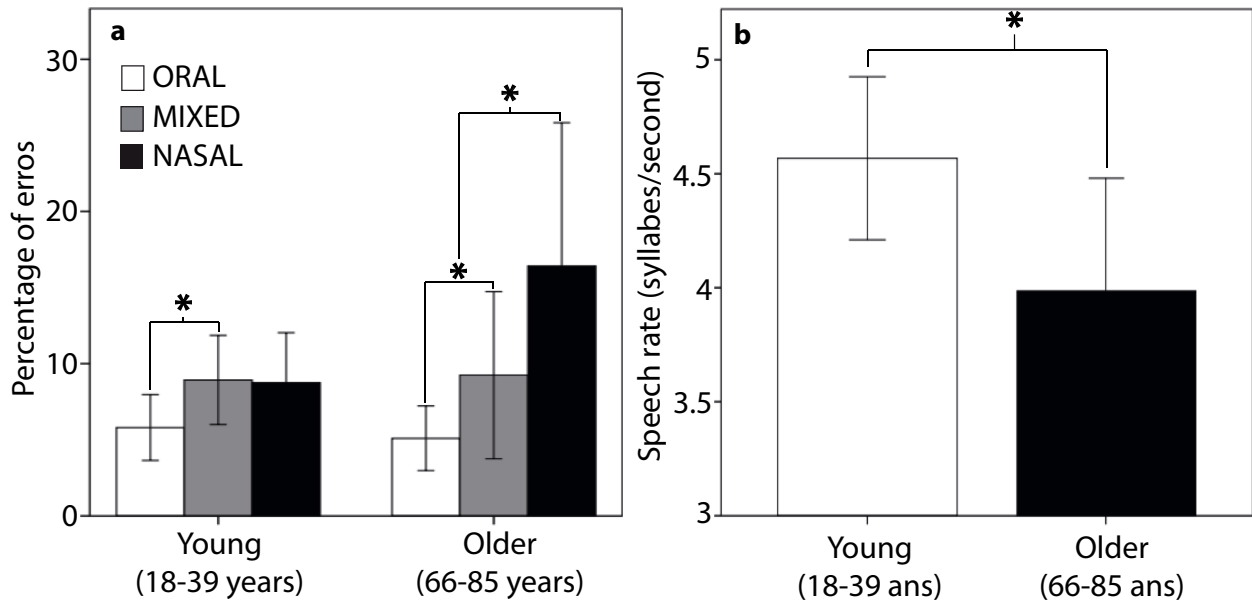


Figure 9 : (a) Response accuracy (percentage of errors), and (b) Response rate (in syllables per seconds), displayed as a function of articulatory complexity (oral, mixed, nasal) and age (young, older adults). Asterisks indicate significant differences. The error bars represent the standard error of the mean.

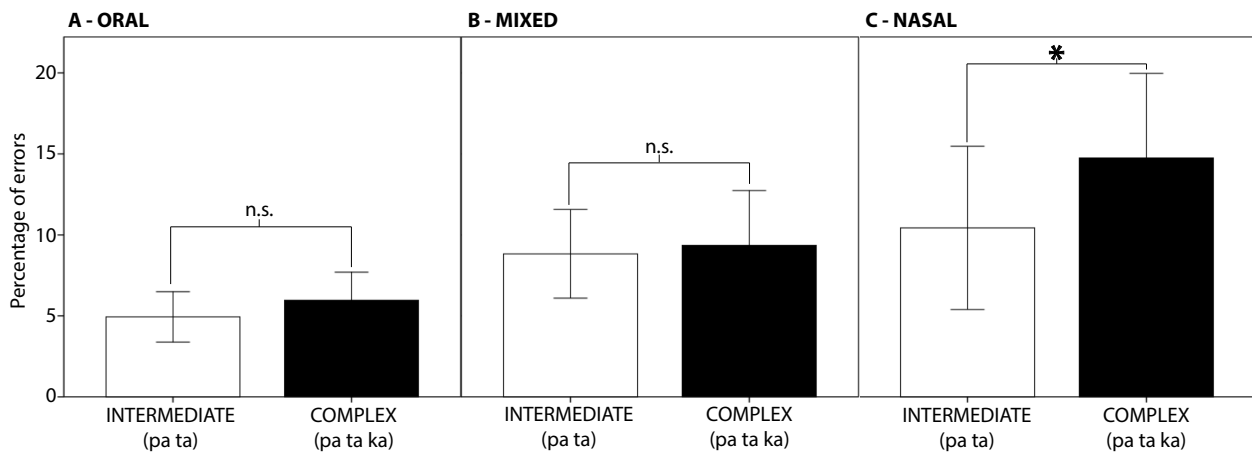


Figure 10 : Response accuracy (percentage of errors) displayed as a function of sequential complexity (intermediate, complex) for (a) ORAL sequences, (b) MIXED sequences and (c) NASAL sequences. Asterisks indicate significant differences.

The 2x2x3 ANCOVA (Group X Sequence complexity X Resonance) conducted on speech rate revealed a significant main effects of Sequence complexity ($F_{(1,28)} = 7.060$ $\rho = 0.013$) and Resonance ($F_{(2,56)} = 77.154$ $\rho < 0.001$) but no interactions. In general, participants were faster for ORAL than NASAL ($t_{(29)} = 10.235$,

$\rho < 0.001$) and MIXED sequences ($t_{(29)} = 5.633, \rho < 0.001$), and faster for MIXED compared to NASAL sequences ($t_{(29)} = -11.068, \rho < 0.001$).

The 2x3 ANCOVA (Group X Sequence complexity) conducted on the percentage of errors revealed a significant main effect of Sequence complexity ($F_{(2,56)} = 11.381, \rho < 0.001$). In general, participants were more accurate in producing SIMPLE than INTERMEDIATE ($t_{(29)} = -2.493, \rho = 0.019$) and COMPLEX sequences ($t_{(29)} = -4.011, \rho < 0.001$). Participants were also more accurate in producing INTERMEDIATE than COMPLEX sequence ($t_{(29)} = -2.994, \rho = 0.006$). For speech rate, the ANCOVA revealed significant main effects of Sequence complexity ($F_{(2,56)} = 13.853, \rho < 0.001$) and Group ($F_{(1,28)} = 15.240, \rho = 0.0001$). As can be seen in Figure 10b, in general, older adults were slower than younger adults. In both groups, participants were slower for SIMPLE compared to INTERMEDIATE ($t_{(29)} = -3.581, \rho = 0.001$) and COMPLEX sequences ($t_{(29)} = -3.892, \rho = 0.001$). Participants were also slower for the INTERMEDIATE compared to the COMPLEX sequence ($t_{(29)} = -2.693, \rho = 0.012$).

The 2x2 ANCOVA (Group X Resonance) conducted on the percentage of errors for the SIMPLE sequences revealed no significant main effect and no interaction. For speech rate, the results revealed a significant main effect of Resonance ($F_{(1,28)} = 49.782, \rho < 0.001$), with NASAL sequences associated with reduced speech rate, as well as a main effect of Group ($F_{(1,28)} = 4.751, \rho = 0.038$), with the young adults being faster than the older adults.

Physiological effects

As can be seen in Figure 12a, the t-tests revealed that young adults had better tactile sensitivity than older adults for the lips ($t_{(28)} = 1.742, \rho = 0.046$) and tongue ($t_{(28)} = 2.066, \rho = 0.024$). As seen in Figure 2b, endurance of the lips was higher for young than older adults ($t_{(27)} = 3.651, \rho < 0.001$). No age effects were found for strength (Figure 12c).

The mediation analysis (Figure 12d) revealed that lip endurance decreased with age ($a = -46.361, SE 12.238, \rho = 0.001$), and that it was positively associated with the overall percentage of errors ($b = 0.105, SE 0.040, \rho = 0.017$), leading to a significant negative indirect effect of Group on percentage of errors ($ab = -4.845, SE 3.153, CI = -13.438$ to -0.049) through lip endurance. There was, however, evidence that age was associated with errors independent of lip endurance ($c = 7.7067, SE 2.9519, \rho = 0.018$), meaning that with age, performance decreased, and indicative of a *partial mediation* of lip endurance. No other mediation was

found for the percentage of errors, and no mediation was found for speech rate. There was a direct relationship between lip strength and the covariate sex ($\beta = -5,855$, SE 1.792, $p = 0,003$).

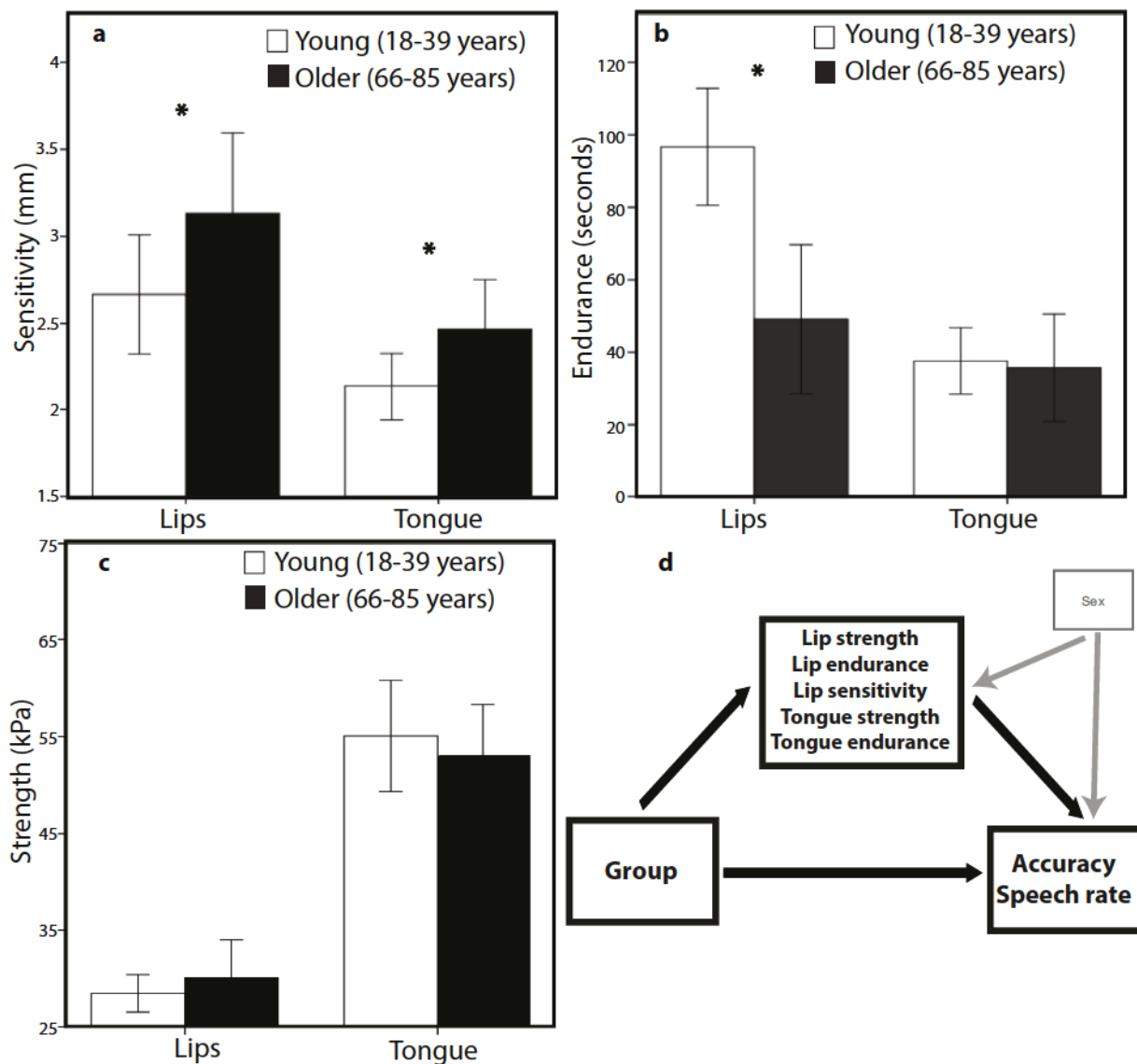


Figure 11 : Measures of orofacial physiology (a) Tactile sensitivity (mm), (b) Endurance (in seconds), and (c) Strength (kPa), displayed as a function of articulator (lips, tongue) and age (young, older adults). Asterisks indicate significant differences. The error bars represent the standard error of the mean. (d) Mediation model that was used to investigate the impact of orofacial physiological measures on speech production in aging.

DISCUSSION

Though speaking is an immensely important component of our personal and professional lives, little is known about the manner and extent to which it declines with age. The goal of the present study was therefore

to explore the impact of normal aging on speech production by manipulating sequential and articulatory complexity during a syllable production task (modified DDK paradigm), and through an investigation of the role of orofacial physiology.

Consistent with the literature, we found that speech rate decreased with aging ([Dromey et al., 2014](#); [Ryan, 1972](#); [Sadagopan & Smith, 2013](#); [Salthouse, 1996](#); [Smith et al., 1987](#)), while overall accuracy did not. It is possible that older adults choose to speak slower to maintain a good accuracy. As we expected, increase in sequential complexity was associated with decreased accuracy, though the complexity effect was similar across groups. In a previous study from our group, we found that older adults were more affected by sequence complexity than younger adults; however, the structure of the syllables that were used were significantly more complex syllables (CCVC) ([Bilodeau-Mercure et al., In press](#)) than the ones that we used here (CV), which is also consistent with results from another group who showed age effects during the production of long nonwords with complex syllables (e.g. CVC CV CV CVC) ([Sadagopan & Smith, 2013](#)). Importantly, we found a significant decline in accuracy for the older adults, but only for the production of sequences of nasal vowels, thus confirming that simple syllables are preserved in normal aging, and demonstrating, for the first time, a vulnerability of nasal vowels to normal aging, even when embedded within simple CV syllables. Surprisingly, the effect of Resonance that was found was not the one we expected: difficulty increased with the total number of nasal vowels, not because of the need to alternate between oral and nasal vowels across syllables within a sequence. Age effects on resonance have been inconsistently reported in the literature ([Amerman & Parnell, 1990](#); [D'Haeseleer, Depypere, Claeys, & Van Lierde, 2011](#); [Hoit et al., 1994](#); [Hutchinson et al., 1978](#); [Rochet et al., 1998](#); [Seaver et al., 1991](#)). However, none of the previous studies has examined articulatory accuracy. In the NASAL condition participants were forced to alternate between oral consonants and nasal vowels within syllable boundaries; therefore they had to move their velum extremely rapidly and precisely. Furthermore, to produce nasal sounds, participant needed to synchronize the velum movement with the movement of the tongue and lips. It is therefore possible that the difficulty with the nasal sounds reflects a difficulty with the control of the velum or with the synchronisation process, or both. It also has been suggest that age-related physiological change affecting the velum can result in neuromuscular weakness ([Hutchinson et al., 1978](#)). Further studies are needed to uncover the mechanisms that underlying the age-related vulnerability of nasal vowels.

Another important finding of the present study is that lip endurance partially mediated the effect of age on speech production. As was expected ([Calhoun et al., 1992](#); [Wohlert & Smith, 1998](#)), sensitivity also declined with age, but only lip endurance affected speech production. No age-related decline for lips or tongue strength was found. Some studies reported age affects on strength ([Crow & Ship, 1996](#); [Neel & Palmer, 2012](#); [Vanderwegen et al., 2013](#); [Wohlert & Smith, 1998](#)) but not others studies ([Clark & Solomon, 2012](#); [Vitorino,](#)

[2010](#)). Nevertheless, the present finding is consistent with a study showing no relation between oro-facial strength and speech rate in a DDK task ([Neel & Palmer, 2012](#)). This result may be explained because speaking only requires a small amount of strength. Interestingly, the finding of a *partial* mediation effect of lip endurance on speech production demonstrates that decline in speech performance cannot entirely be accounted for by peripheral changes in the vocal apparatus, but may also include other factors such as an age-related decline in the neural planning and control of speech movements. Recent studies from our group have shown important age-related changes in the structure and function of brain areas involved in speech motor control ([Bilodeau-Mercure et al., 2015](#); [Tremblay & Deschamps, Revisions submitted](#); [Tremblay et al., 2013](#)), consistent with the notion of a multifactorial aetiology that includes physiological and neural factors.

CONCLUSION

This study provides important new empirical data on the aging of speech production in cognitively healthy adults. Our results show that nasal sounds are particularly vulnerable to aging. Our study also shows that even if many physiological changes in the oro-facial sphere occur in aging, only lips endurance is related to age-related decline in speech performance, at least during the production of meaningless sequences of syllables. Appropriate treatment for older adults with speech difficulties critically depends upon the ability to tease apart normal from pathological processes, which requires knowledge of the nature and range of normal aging mechanisms, and a better understanding of the aetiology of these deficits.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by grants from the Canadian Foundation for Innovation (FCI), the Fonds Québécois de la Recherche – Société et Culture (FRQ-SC), and the Fonds Québécois de la Recherche – Santé (FRQ-S) to P.T., as well as from a scholarship from the Faculté de Médecine de l'Université Laval to M.B-M. These sponsors played no part in study. We thank C. Ouellet for her help with the transcriptions, I. Deschamps for her comments on a version of this manuscript, and the participants.

AUTHOR CONTRIBUTIONS. M.B-M. and P.T. designed the study and wrote the manuscript together. M.B-M. collected and analyzed the data under the supervision of P.T.

Funding Sources:

Infrastructure grant from the Canadian Foundation for Innovation (CFI) to P.T.

Research funds from the Fonds Québécois de la Recherche – Société et Culture (FRQ-SC) to P.T.

Research funds from the Fonds Québécois de la Recherche – Santé (FRQ-S) to P.T.

A research scholarship from the Faculté de Médecine de l'Université Laval to M.B-M.

REFERENCES

1. Ryan WJ. Acoustic aspects of the aging voice. *Journal of gerontology*. 1972 Apr;27(2):265-8. PubMed PMID: 5060732. Epub 1972/04/01. eng.
2. Dromey C, Boyce K, Channell R. Effects of age and syntactic complexity on speech motor performance. *Journal of speech, language, and hearing research : JSLHR*. 2014 Dec;57(6):2142-51. PubMed PMID: 25215529.
3. Smith BL, Wasowicz J, Preston J. Temporal characteristics of the speech of normal elderly adults. *J Speech Hear Res*. 1987 Dec;30(4):522-9. PubMed PMID: 3695445. Epub 1987/12/01. eng.
4. Sadagopan N, Smith A. Age differences in speech motor performance on a novel speech task. *Journal of speech, language, and hearing research : JSLHR*. 2013 Oct;56(5):1552-66. PubMed PMID: 24023373.
5. Tremblay P, Deschamps I. Structural brain aging and speech production: a surface-based brain morphometry study. *Brain Struct Funct*. Revisions submitted.
6. Vousden JI, Maylor EA. Speech errors across the lifespan. *Language and Cognitive Processes*. 2006 2006/01/01;21(1-3):48-77.
7. Shuey EM. Intelligibility of older versus younger adults' CVC productions. *J Commun Disord*. 1989 Dec;22(6):437-44. PubMed PMID: 2621260. Epub 1989/12/01. eng.
8. Parnell MM, Amerman JD. Perception of oral diadochokinetic performances in elderly adults. *J Commun Disord*. 1987 Aug;20(4):339-51. PubMed PMID: 3624529. Epub 1987/08/01. eng.
9. Amerman JD, Parnell MM. Auditory impressions of the speech of normal elderly adults. *Br J Disord Commun*. 1990 Apr;25(1):35-43. PubMed PMID: 2198069. Epub 1990/04/01. eng.
10. Bilodeau-Mercure M, Kirouac V, Langlois N, Ouellet C, Gasse I, Tremblay P. Movement sequencing in normal aging: speech, oro-facial and finger movements. *Age*. In press.
11. D'Haeseleer E, Depypere H, Claeys S, Van Lierde KM. Nasal resonance in middle-aged women: a multiparameter approach. *Ann Otol Rhinol Laryngol*. 2011 Sep;120(9):575-80. PubMed PMID: 22032070. Epub 2011/10/29. eng.
12. Seaver EJ, Dalston RM, Leeper HA, Adams LE. A study of nasometric values for normal nasal resonance. *J Speech Hear Res*. 1991 Aug;34(4):715-21. PubMed PMID: 1956179. Epub 1991/08/01. eng.
13. Rochet AP, Rochet BL, Sovis EA, Mielke DL. Characteristics of nasalance in speakers of Western Canadian English and French. *Journal of Speech-Language Pathology & Audiology*. 1998;22(2):94-103. PubMed PMID: 1999035010. Language: English. Entry Date: 19990501. Revision Date: 20121228. Publication Type: journal article.

14. Hutchinson JM, Robinson KL, Nerbonne MA. Patterns of nasalance in a sample of normal gerontologic subjects. *J Commun Disord.* 1978 Dec;11(6):469-81. PubMed PMID: 739062. Epub 1978/12/01. eng.
15. Hoit JD, Watson PJ, Hixon KE, McMahon P, Johnson CL. Age and velopharyngeal function during speech production. *J Speech Hear Res.* 1994 Apr;37(2):295-302. PubMed PMID: 8028310. Epub 1994/04/01. eng.
16. Calhoun KH, Gibson B, Hartley L, Minton J, Hokanson JA. Age-related changes in oral sensation. *Laryngoscope.* 1992 Feb;102(2):109-16. PubMed PMID: 1738279. Epub 1992/02/01. eng.
17. Heft MW, Robinson ME. Age differences in orofacial sensory thresholds. *J Dent Res.* 2010 Oct;89(10):1102-5. PubMed PMID: 20651093. Pubmed Central PMCID: PMC3318051. Epub 2010/07/24. eng.
18. Wohlert AB, Smith A. Spatiotemporal stability of lip movements in older adult speakers. *J Speech Lang Hear Res.* 1998 Feb;41(1):41-50. PubMed PMID: 9493732. Epub 1998/03/11. eng.
19. Neel AT, Palmer PM. Is tongue strength an important influence on rate of articulation in diadochokinetic and reading tasks? *Journal of speech, language, and hearing research : JSLHR.* 2012 Feb;55(1):235-46. PubMed PMID: 22199202. Epub 2011/12/27. eng.
20. Crow HC, Ship JA. Tongue strength and endurance in different aged individuals. *The journals of gerontology Series A, Biological sciences and medical sciences.* 1996 Sep;51(5):M247-50. PubMed PMID: 8808997. Epub 1996/09/01. eng.
21. Vanderwegen J, Guns C, Van Nuffelen G, Elen R, De Bodt M. The influence of age, sex, bulb position, visual feedback, and the order of testing on maximum anterior and posterior tongue strength and endurance in healthy belgian adults. *Dysphagia.* 2013 Jun;28(2):159-66. PubMed PMID: 22983359. Epub 2012/09/18. eng.
22. Yesavage JA, Brink TL, Rose TL, Lum O, Huang V, Adey M, et al. Development and validation of a geriatric depression screening scale: a preliminary report. *J Psychiatr Res.* 1982;17(1):37-49. PubMed PMID: 7183759. Epub 1982/01/01. eng.
23. Nasreddine ZS, Chertkow H, Phillips N, Bergman H, Whitehead V. Sensitivity and Specificity of The Montreal Cognitive Assessment (MoCA) for Detection of Mild Cognitive Deficits. *Can J Neurol Sci.* 2003;30(30).
24. Vitorino J. Effect of age on tongue strength and endurance scores of healthy Portuguese speakers. *International journal of speech-language pathology.* 2010 Jun;12(3):237-43. PubMed PMID: 20433342. Epub 2010/05/04. eng.
25. Preacher KJ, Hayes AF. SPSS and SAS procedures for estimating indirect effects in simple mediation models. *Behav Res Methods Instrum Comput.* 2004 Nov;36(4):717-31. PubMed PMID: 15641418. Epub 2005/01/12. eng.
26. Hayes AF. Introduction to Mediation, Moderation, and Conditional Process Analysis: A Regression-Based Approach. Little TD, editor: The Guilford Press 2013.

27. Bilodeau-Mercure M, Lortie CL, Sato M, Guitton MJ, Tremblay P. The neurobiology of speech perception decline in aging. *Brain Struct Funct.* 2015 Mar;220(2):979-97. PubMed PMID: 24402675. Epub 2014/01/10. eng.
28. Salthouse TA. The processing-speed theory of adult age differences in cognition. *Psychological review.* 1996 Jul;103(3):403-28. PubMed PMID: 8759042.
29. Clark HM, Solomon NP. Age and sex differences in orofacial strength. *Dysphagia.* 2012 Mar;27(1):2-9. PubMed PMID: 21350818. Epub 2011/02/26. eng.
30. Tremblay P, Dick AS, Small SL. Functional and structural aging of the speech sensorimotor neural system: functional magnetic resonance imaging evidence. *Neurobiol Aging.* 2013 Aug;34(8):1935-51. PubMed PMID: 23523270. Pubmed Central PMCID: PMC3651767. Epub 2013/03/26. eng.

4 Discussion et Conclusion

Malgré l'extrême importance de la parole dans notre vie, peu d'études ont caractérisé son vieillissement. Dans le contexte du vieillissement de la population, il est essentiel de connaître l'impact du vieillissement sur la communication. L'objectif général de ce mémoire était d'examiner l'impact de différents facteurs linguistiques et physiologiques sur la production de la parole au cours du vieillissement, principalement, l'impact de la complexité séquentielle. Notre hypothèse générale était que la performance des personnes âgées serait moins bonne que celles des jeunes adultes, surtout lors de la production de séquences complexes, et que cet effet serait amplifié lorsque la complexité articulatoire est élevée. Nous supposons également que le vieillissement de la parole était un phénomène général de vieillissement des actes moteurs fins causé en partie par le déclin de la sensibilité et de l'endurance des articulateurs. Dans cette section, un retour sur les principaux résultats sera présenté et les forces ainsi que les limites des études seront discutées. Nous terminerons par une discussion sur les perspectives futures.

4.1. Synthèse des résultats principaux

4.1.1. Vieillessement de la parole : effets globaux

Nos deux études confirment un déclin de la performance lors de la production de parole chez des personnes en bonne santé physique et cognitive. En effet, les résultats de la première étude ont démontré que les personnes âgées faisaient plus d'erreurs que les jeunes adultes lors de la production de séquences de syllabes, particulièrement lorsque ces séquences étaient complexes. De plus, l'Étude 2 démontre une diminution de vitesse chez les personnes âgées. Ce ralentissement a été démontré dans de nombreuses études antérieures ([Dromey et al., 2014](#); [Duchin & Mysak, 1987](#); [Fozo & Watson, 1998](#); [Morris & Brown Jr, 1987](#); [Ramig, 1983a](#); [Ryan, 1972](#); [Ryan & Burk, 1974](#); [Sadagopan & Smith, 2013](#); [Searl et al., 2002](#); [Smith et al., 1987](#); [Tremblay & Deschamps, Revisions submitted](#)). Les personnes âgées sont non seulement moins rapides, mais font également plus d'erreurs dans certains contextes.

4.1.2. Vieillessement et complexité séquentielle

L'effet du vieillissement sur le nombre d'erreurs démontré dans l'Étude 1 n'a pas été répliqué dans l'Étude 2, même lorsque les séquences étaient complexes. Toutefois, il importe de préciser que dans l'Étude 1, les syllabes utilisées étaient très difficiles sur le plan articulatoire (CCVC), étant formées d'un groupe consonantique à l'attaque (le début de la syllabe) et d'une consonne en coda (la fin de la syllabe) (p. ex. : /krik/). Par contre, dans l'Étude 2, les syllabes utilisées étaient simples (CV) avec une seule consonne en attaque et aucune consonne en coda (p. ex. : /pa/). De ce fait, il est possible que l'impact de la complexité séquentielle sur la production de la parole dans le vieillissement soit modulé par la complexité articulatoire. Ce résultat est cohérent avec la littérature. En effet, Sadagopan et Smith ont trouvé un effet de complexité séquentielle qui augmentait avec l'âge, et leurs séquences de syllabes étaient extrêmement difficiles sur le plan articulatoire (p. ex. : /mab, skree, sploy, stroob/) ([Sadagopan & Smith, 2013](#)) comparées aux syllabes utilisées dans l'Étude 2 (p. ex. : /pa, ta, ka/). Une étude de notre laboratoire a également trouvé une interaction entre l'âge et la complexité séquentielle sur la durée des réponses, mais pas sur le pourcentage d'erreur. Les syllabes utilisées étaient encore une fois relativement simples (p. ex. : /pra/) ([Tremblay & Deschamps, Revisions submitted](#)). De plus, dans l'Étude 2, un effet de complexité séquentielle sur le pourcentage a été trouvé pour les deux groupes dans les séquences ne contenant que des voyelles nasales, lesquelles sont plus complexes sur le plan articulatoire. Ce fait supporte ainsi notre hypothèse d'une interaction entre la complexité séquentielle et la complexité articulatoire. Peu de chercheurs se sont intéressés à la capacité de séquençage de la parole dans le vieillissement. Pourtant, cette capacité est extrêmement importante puisque la parole est fondamentalement un acte moteur sériel. Les études de ce mémoire ont permis de mieux comprendre l'impact de la complexité séquentielle sur la production de parole dans le vieillissement et de découvrir que cet impact varie selon la complexité des syllabes qui composent les séquences.

4.1.3. Vieillessement et complexité articulatoire

La comparaison de nos deux études démontre que les personnes âgées ont non seulement plus de difficulté avec les séquences complexes, mais également avec les syllabes complexes. En

effet, les personnes âgées font plus d'erreurs que les jeunes dans les séquences simples lorsque les syllabes utilisées sont complexes (Étude 1), mais pas lorsque les syllabes sont simples (Étude 2). Les résultats de l'Étude 2 démontrent une difficulté à produire des syllabes complexes dans le vieillissement. Un effet principal de complexité articulatoire a en effet été trouvé chez les personnes âgées seulement. Lorsque les syllabes contiennent des voyelles nasales, les personnes âgées produisent plus d'erreurs que lorsque les syllabes contiennent des syllabes orales. Il est possible que cette difficulté soit due à la combinaison d'un son oral, la consonne, et d'un son nasal, la voyelle, au sein d'une même syllabe, ce qui exige un contrôle rapide et précis du voile du palais. Une autre possibilité est que la production d'un son nasal soit plus difficile pour les personnes âgées, peu importe le contexte puisque cette dernière exige la coordination des mouvements du voile du palais avec les mouvements de la langue et des lèvres. Certaines études sur la résonance nasale suggèrent un déclin du contrôle du voile du palais avec l'âge ([D'Haeseleer, Depypere, Claeys, & Van Lierde, 2011](#); [Seaver et al., 1991](#)). Par contre, plusieurs études n'ont pas trouvé d'effet de l'âge sur la résonance nasale ([Amerman & Parnell, 1990](#); [Brancewicz & Reich, 1989](#); [Hoit et al., 1994](#); [Hutchinson et al., 1978](#)). Le déclin de la capacité à contrôler le voile du palais pourrait être causé par des changements physiologiques tels une faiblesse neuromusculaire ([Hutchinson et al., 1978](#)). En somme, les personnes âgées semblent avoir plus de difficulté que les jeunes à produire des syllabes complexes sur le plan articulatoire, particulièrement les syllabes contenant des sons nasaux.

4.1.4. Vieillesse physiologique

Bien qu'aucune mesure directe (physiologique) n'ait été effectuée sur le voile du palais, puisque cette structure est difficilement accessible (étant située tout au fond de la cavité buccale), ce mémoire a permis d'observer que plusieurs facteurs physiologiques déclinent avec l'âge et que le déclin de l'endurance des lèvres a un impact sur la production de la parole. Jusqu'à présent, aucune étude ne s'était intéressée au déclin de l'endurance des lèvres dans le vieillissement. Une seule étude a examiné le lien entre un facteur physiologique, la force de la langue, et la production de la parole chez des sujets sains ([Neel & Palmer, 2012](#)). Cette étude n'a pas trouvé de lien entre la mesure de force de la langue et la vitesse de production de parole. Ce résultat n'est pas étonnant puisque la force nécessaire pour parler ne représente qu'une petite partie de la force maximale de la langue ([Neel & Palmer, 2012](#)). L'endurance, au contraire, est une mesure importante, car une moins bonne endurance peut affecter la précision articulatoire. En effet, lors d'une étude de Solomon, des participants ont répété une tâche de force maximale de la langue jusqu'à ce que la fatigue entraîne une diminution de

leur endurance. Les participants ont été jugés moins précis lors des tâches de parole exécutées après la diminution de l'endurance que lors des tâches de parole produites avant la tâche de force maximale (Solomon, 2000). Toutefois, puisque le déclin de l'endurance n'explique qu'en partie le déclin de performance avec l'âge, d'autres facteurs sont à considérer, comme un déclin de la planification et du contrôle des mouvements de parole par le cerveau. En effet, des études de notre groupe ont démontré des changements au niveau de la structure et de la fonction des aires du cerveau impliquées dans le contrôle moteur de la parole liés à l'âge (Bilodeau-Mercure et al., 2015; Tremblay & Deschamps, Revisions submitted; Tremblay et al., 2013). De plus, puisque le déclin de performance est accentué lors de la production de séquences et de syllabes complexes, cela renforce l'hypothèse des changements neuronaux dans le contrôle et la planification des mouvements de la parole. Ainsi, les causes du déclin de performance lors de la production de la parole dans le vieillissement semblent multifactorielles, impliquant à la fois des facteurs physiologiques et neurologiques.

4.1.5. Vieillessement et contrôle moteur fin

L'Étude 1 a permis d'observer un déclin similaire pour les mouvements oro-faciaux et pour la parole, supportant ainsi l'hypothèse de mécanismes de contrôle des mouvements généraux dans un système intégratif (Ballard, Robin, & Folkins, 2003; McFarland & Tremblay, 2006). Ainsi, certains mécanismes seraient utilisés pour le contrôle de tous les mouvements fins de la sphère oro-faciale et il n'y aurait pas ou peu de mécanismes spécifiques au contrôle moteur de la parole. En support à cette hypothèse, des études ont démontré que la sélection de mouvements oro-faciaux et de la parole impliquait des aires du cerveau similaires (Tremblay & Gracco, 2009, 2010a). En effet, ces études démontrent que pour la parole et les mouvements oro-faciaux, l'aire prémotrice supplémentaire (pre-SMA) est centrale lors de la sélection volitionnelle de mouvements, c'est-à-dire lorsque le participant choisit le mouvement qu'il désire effectuer. De plus, les patients ayant des difficultés à produire la parole ont souvent de la difficulté à produire des mouvements oro-faciaux (Alcock, 2006; Alcock et al., 2000). Il semble donc que la parole et les mouvements oro-faciaux soient contrôlés par des circuits non indépendants et qu'ils soient affectés par des mécanismes neurobiologiques de vieillissement similaires. Il est également possible que les mêmes facteurs physiologiques affectent la production de la parole et les mouvements oro-faciaux puisque les mêmes structures (langue, lèvres, etc.) sont utilisées; cette question n'a toutefois pas été abordée dans le cadre de ce mémoire. Les données

généérées dans le cadre de ce mémoire soutiennent toutefois l'hypothèse d'un système moteur oro-facial intégratif et multifonctionnel développé par Ballard et ses collègues ([Ballard et al., 2003](#)).

Par contre, le vieillissement ne semble pas affecter de la même façon tous les mouvements fins. En effet, l'Étude 1 n'a démontré aucun impact du vieillissement sur le pourcentage d'erreur des mouvements de doigts. Néanmoins, la durée des réponses était affectée par le vieillissement, de même que par la complexité séquentielle. Il est possible que des mécanismes différents contrôlent la sphère oro-faciale ainsi que les mains/doigts, ce qui expliquerait le patron de vieillissement différent. Une étude démontre pourtant des mécanismes de sélection similaires pour la parole et le mouvement des doigts ([Tremblay et al., 2008](#)). Dans cette étude, en utilisant l'électroencéphalographie (EEG), des patrons d'activation similaires ont été observés pour la production de mouvements de doigts et de parole. Pour les deux mouvements, l'EEG a été sensible à la différence entre la sélection volitionnelle et la sélection forcée de mouvements. Cette étude indique qu'il existe certains mécanismes communs pour la sélection de réponses lors de la production de parole et de mouvements de doigts. Il est possible que tout comme pour la sélection de réponses, les mêmes mécanismes soient responsables du séquençage de la parole et des mouvements de doigts. Par conséquent, il est possible que le vieillissement entraîne un déclin général, non spécifique à la sphère oro-faciale, de la capacité à contrôler les mouvements fins, mais que ce déclin ne soit pas assez marqué pour affecter le pourcentage d'erreur des tâches relativement faciles, comme celle que nous avons utilisée dans l'Étude 1. En effet, le pourcentage d'erreur dans la tâche de doigts utilisée dans l'Étude 1 est très bas. De plus, un effet d'âge global sur le pourcentage d'erreur n'a pas été trouvé dans la tâche de parole qui a été utilisée dans l'Étude 2 et qui utilisait des syllabes plus faciles. Toutefois, il est également possible que certains mécanismes de contrôle, comme le séquençage, diffèrent en fonction du type de mouvement spécifique utilisé et que leur trajectoire de vieillissement soit distincte. D'autres études sont nécessaires pour explorer plus en détail la relation entre le vieillissement du contrôle des mouvements des doigts et de la parole. De manière générale, nos résultats renforcent l'hypothèse d'un déclin de la performance maximale du contrôle moteur fin chez les aînés dans plusieurs modalités avec toutefois des trajectoires de vieillissement non identiques pour tous les mouvements.

4.2. Forces et limites

Les études constituant ce mémoire présentent des forces et des limites. L'absence d'influence linguistique sur les stimuli utilisés, le nombre de participants dans l'Étude 1 et le nombre de mesures

dans l'Étude 2 constituent des forces, alors que la validité écologique limitée des stimuli, le nombre de participants de l'Étude 2 et le faible nombre de participants très âgés dans les deux études constituent les limites principales de nos études. Ces forces et limites sont discutées dans les paragraphes subséquents.

Premièrement, l'utilisation de séquences de syllabes comme stimuli a permis d'éviter les effets descendants linguistiques ([Allegretti & Puglisi, 1982](#); [Dispaldro et al., 2009](#); [Dispaldro et al., 2013](#); [Krueger & Weiss, 1976](#); [Reicher, 1969](#)). Il semble qu'un mot, contrairement à un non-mot, ne soit pas perçu comme une série de lettres, mais qu'il soit plutôt perçu dans sa globalité ([Reicher, 1969](#)). Par conséquent, l'utilisation de mots ou de phrases peut faciliter la production de parole et masquer les difficultés de parole. L'utilisation de syllabes permet d'évaluer la performance articulatoire maximale. Il est important de mesurer la performance maximale « pure », car une performance maximale réduite peut diminuer la capacité d'une personne à ajuster sa parole à différentes situations et révéler si la production de la parole devient globalement plus difficile ([Kent et al., 1987](#)). Parce qu'elles sont plus sensibles que les mesures de performance « moyennes », les mesures de performance maximale sont également typiquement utilisées en clinique pour diagnostiquer les troubles de la parole, pour ainsi en mesurer la sévérité ([Kent et al., 1987](#)). Par contre, l'utilisation de ce type de tâche a aussi des désavantages. En effet, cette tâche a peu de validité écologique, c'est-à-dire qu'elle ne représente pas les comportements qui se produisent en contexte naturel. Lorsque des adultes produisent de la parole, il est en effet assez rare que cette production soit dénudée de sens, comme les séquences de syllabes produites dans les deux études.

La qualité de l'échantillon de l'Étude 1, malgré sa nature non probabiliste, constitue une grande force du mémoire. Cet échantillon comportait une grande étendue d'âge avec un nombre important de participants dans chacun des quatre groupes d'âge (entre 17 et 22 participants). Puisque des participants âgés de 22 à 83 ans ont participé à cette étude, cela a permis non seulement de connaître les changements de production de parole entre les jeunes adultes et les personnes âgées, mais aussi de savoir quand débutaient ces changements. En effet, cet échantillon de participants a permis de démontrer que l'impact du vieillissement débute chez les adultes d'âge moyen (entre 37 et 54 ans) puisque l'effet de complexité sur le pourcentage d'erreur est plus grand pour les participants de ce groupe d'âge que pour les jeunes adultes (22-34 ans). Cette force fait cependant défaut dans l'Étude 2. En effet, un nombre plus restreint de participants ont été testés et aucun participant âgé entre 39 et 66 ans n'a participé à l'étude. Un grand nombre de mesures a été recueilli lors de cette étude, ce qui faisait en sorte que l'évaluation et l'analyse des données de chaque participant prenaient beaucoup de temps. Puisque cette étude a été entièrement réalisée dans le cadre d'une maîtrise d'une durée de

deux ans, tester un grand nombre de participants n'aurait pas été réalisable. Étant donné le nombre limité de participants, seuls deux groupes d'âge ont été évalués afin qu'il y ait un plus grand nombre de personnes dans chaque groupe, et ainsi, une meilleure représentativité pour ces groupes d'âge. C'est pour cette raison qu'aucun adulte d'âge moyen (entre 39 et 66 ans) n'a été recruté pour l'Étude 2.

Notre échantillon avait une autre limite. En effet, dans l'Étude 2, seulement trois participants étaient âgés de 80 et plus et aucun participant n'était âgé de plus de 85 ans. Dans l'Étude 1, 6 participants étaient âgés de 80 ans et plus, mais un seul de plus de 85 ans. Selon Statistique Canada, en 2011, le Canada comptait 1,4 million de personnes âgées de plus de 80 ans. C'est pourquoi il est important de comprendre l'impact du vieillissement sur la production de la parole chez les personnes très âgées. Malheureusement, les participants en santé de ce groupe d'âge sont très difficiles à recruter. En effet, plusieurs présentations dans les maisons de retraite ont été effectuées, des courriels ont été envoyés aux membres de nombreux organismes et clubs offrant des activités aux aînés et plus d'une centaine d'affiches ont été déposées à de nombreux endroits (dépanneurs, pharmacies, salons de coiffure, centres communautaires, etc.) Malgré tous ces efforts de recrutement, peu de participants très âgés ont accepté de participer aux études.

Finalement, le grand nombre de mesures recueillies lors de l'Étude 2 constitue une force de l'étude. En effet, ce grand nombre de mesures a permis d'avoir un portrait global du vieillissement de la parole et des facteurs physiologiques pouvant l'affecter.

4.3. Perspectives de recherche

Ce mémoire permet de mieux comprendre les facteurs linguistiques et physiologiques affectant la capacité à produire la parole dans le vieillissement. De nombreuses questions ont cependant été soulevées. Dans cette section, différentes pistes de recherches seront présentées.

4.3.1. Nasalité

La première question a été mentionnée lors de la synthèse des résultats. Les syllabes contenant des voyelles nasales sont moins bien réussies par les personnes âgées. Il est possible que cette difficulté soit due à la combinaison d'un son oral, la consonne, et d'un son nasal, la voyelle, au sein

d'une même syllabe (p. ex. : /ban/ vs /ba/). Par contre, il est possible qu'un son nasal soit plus difficile à produire pour les personnes âgées, peu importe le contexte (p. ex. : /an/ est plus difficile que /a/). Afin de mieux comprendre le mécanisme sous-jacent à la difficulté mise en lumière dans ce mémoire, il serait possible de tester ces deux hypothèses en comparant la production de syllabes dans lesquelles la consonne et la voyelle sont orales (p. ex. : /pa/, /bo/) et la production de syllabes dans lesquelles la consonne et la voyelle sont nasales (p. ex. : /man/, /non/) ainsi que la production de syllabes mixtes (p. ex. : /ban/, /pon/). Il pourrait également être intéressant de distinguer la combinaison consonne orale + voyelle nasale (p. ex. : /ban/) et la combinaison consonne nasale + voyelle orale (p. ex. : /mo/, /na/).

4.3.2. Fréquence des syllabes

Ce mémoire a mis en évidence l'interaction entre la complexité articulatoire (la nasalité) et la complexité séquentielle. D'autres facteurs pourraient également interagir avec la complexité séquentielle lors de la production de parole dans le vieillissement. Lorsque nous parlons, certaines syllabes sont prononcées plus fréquemment, alors que d'autres non. Les syllabes les plus fréquentes sont plus faciles à produire que les syllabes moins fréquentes ([Cholin, Levelt, & Schiller, 2006](#)). Non seulement certaines syllabes sont plus fréquentes que d'autres, mais certaines combinaisons de syllabes le sont également. En effet, selon un projet en cours de réalisation de notre laboratoire, 5 % des syllabes utilisées en français québécois sont utilisées 78 % du temps et 5 % des combinaisons de deux syllabes sont utilisées 47 % du temps ([Bédard et al., En rédaction](#)). Il est possible que les syllabes et les combinaisons de syllabes fréquentes soient mieux conservées dans le vieillissement. Par conséquent, il serait intéressant de comparer les productions de syllabes et de séquences plus ou moins fréquentes.

4.3.3. Facteurs physiologiques

Lors de l'Étude 2, la sensibilité, l'endurance et la force de la langue ainsi que des lèvres ont été évaluées, et un lien a été trouvé entre l'endurance des lèvres et la production de la parole dans le vieillissement. Par contre, de nombreux facteurs physiologiques restent à explorer. Ainsi, aucune mesure n'a été effectuée sur le voile du palais. Cette structure est cependant difficilement accessible, étant donné son emplacement au fond de la cavité buccale. Certaines études ont cependant mesuré la

sensibilité du voile du palais grâce à un appareil envoyant des jets d'air de différentes intensités ([Shinkai, Hatch, Cornell, & Yeh, 2004](#)). De plus, il est possible d'évaluer le volume du voile du palais avec l'imagerie par résonance magnétique (IRM) ([Mahne et al., 2007](#); [Perry, Kuehn, Sutton, Gamage, & Fang, 2014](#); [Welch et al., 2002](#)), cette méthode est cependant très coûteuse. De plus, il pourrait être intéressant de mesurer la sensibilité du palais dur avec un protocole de discrimination des deux points, semblable à celui utilisé pour l'Étude 2. Un test de discrimination des deux points a déjà été utilisé pour mesurer la sensibilité du palais dur ([Calhoun et al., 1992](#)). La distinction entre la production de plusieurs consonnes repose sur l'emplacement de la langue sur le palais dur (p. ex. : /s, ch/, /z, j/). Les résultats de l'étude réalisée par Calhoun et al. n'ont démontré aucune différence entre les jeunes et les personnes âgées pour la sensibilité du palais dur ([Calhoun et al., 1992](#)). Étant donné qu'il n'y a eu qu'une seule étude sur le sujet, il serait intéressant de répliquer cette étude afin de confirmer les résultats et de vérifier si une moins bonne sensibilité du palais est liée à une diminution de la performance lors de la production de parole.

Il pourrait également être intéressant d'observer l'impact du vieillissement sur les muscles oro-faciaux grâce à l'électromyographie (EMG) de surface (externe). L'EMG de surface permet de mesurer l'activité électrique musculaire, notamment celle des muscles du visage. Lorsqu'une impulsion neuronale arrive à la jonction entre le neurone et le muscle (jonction neuromusculaire), les fibres du muscle se déchargent, créant ainsi une impulsion électrique. C'est cette impulsion électrique qui est détectée par l'EMG. Grâce à cette technique, il est possible d'observer l'intensité, la fréquence et la durée de l'activité EMG ainsi que la fatigabilité des muscles. Les données empiriques existantes indiquent un patron d'activation musculaire oro-faciale différent chez les personnes plus âgées comparativement aux personnes jeunes lors de la production de parole ([Wohlert, 1996a](#)). Par contre, il existe très peu de données sur le lien entre les changements musculaires observés et les performances langagières, comme la vitesse d'élocution et le nombre d'erreurs. Des mesures EMG des muscles entourant les lèvres, principalement le muscle orbiculaire de la bouche (*orbicularis oris*), ont d'ailleurs été recueillies lors de la tâche de l'Étude 2. Il était impossible d'analyser les données EMG dans le cadre de cette maîtrise puisque l'analyse des données EMG est longue et que de nombreuses autres données acoustiques et physiologiques ont été analysées.

4.4. Conclusion

Ce mémoire apporte des données nouvelles sur les facteurs, tant linguistiques que physiologiques, pouvant affecter le déclin de la production de la parole dans le vieillissement normal. D'autres études sont cependant nécessaires afin d'avoir un portrait plus complet du vieillissement normal de la parole. Dans le contexte du vieillissement accéléré de la population mondiale, il est essentiel de mieux comprendre les mécanismes de vieillissement normal afin de les distinguer des mécanismes pathologiques, ceci afin de permettre aux cliniciens, particulièrement aux orthophonistes, d'effectuer des diagnostics différentiels plus précis. Une meilleure connaissance du vieillissement normal des mécanismes de production de la parole est également importante pour le développement de nouvelles stratégies plus ciblées et potentiellement plus efficaces pour la rééducation des troubles de la parole liés à l'âge.

Bibliographie

- Alcock, K. (2006). The development of oral motor control and language. *Downs Syndr Res Pract*, 11(1), 1-8.
- Alcock, K. J., Passingham, R. E., Watkins, K. E., & Vargha-Khadem, F. (2000). Oral dyspraxia in inherited speech and language impairment and acquired dysphasia. *Brain Lang*, 75(1), 17-33. doi: 10.1006/brln.2000.2322
- Allegretti, C. L., & Puglisi, J. T. (1982). Recognition of letters in words and nonwords. *J Gen Psychol*, 107(1st Half), 139-148. doi: 10.1080/00221309.1982.9709915
- Amerman, J. D., & Parnell, M. M. (1990). Auditory impressions of the speech of normal elderly adults. *Br J Disord Commun*, 25(1), 35-43.
- Anstey, K. J., & Low, L. F. (2004). Normal cognitive changes in aging. *Aust Fam Physician*, 33(10), 783-787.
- Aoki, T., & Fukuoka, Y. (2010). Finger tapping ability in healthy elderly and young adults. *Med Sci Sports Exerc*, 42(3), 449-455. doi: 10.1249/MSS.0b013e3181b7f3e1
- Baker, K. K., Ramig, L. O., Sapir, S., Luschei, E. S., & Smith, M. E. (2001). Control of vocal loudness in young and old adults. *J Speech Lang Hear Res*, 44(2), 297-305.
- Ballard, K. J., Robin, D. A., & Folkins, J. W. (2003). An integrative model of speech motor control: A response to Ziegler. *Aphasiology*, 17(1), 37-48. doi: 10.1080/729254889
- Bédard, P., Audet, A.-M., Rivard, J., Roy, J.-P., Drouin, P., & Tremblay, P. (En rédaction). SyllabO: A sublexical database of Quebec spoken French. *Clinical Linguistics & Phonetics*.
- Benjamini, Y., & Hochberg, Y. (1995). Controlling the False Discovery Rate: a Practical and Powerful Approach to Multiple Testing. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 57(1), 289-300.
- Bilodeau-Mercure, M., Kirouac, V., Langlois, N., Ouellet, C., Gasse, I., & Tremblay, P. (In press). Movement sequencing in normal aging: speech, oro-facial and finger movements. *Age*.
- Bilodeau-Mercure, M., Lortie, C. L., Sato, M., Guitton, M. J., & Tremblay, P. (2014). The neurobiology of speech perception decline in aging. *Brain Struct Funct*. doi: 10.1007/s00429-013-0695-3
- Bilodeau-Mercure, M., Lortie, C. L., Sato, M., Guitton, M. J., & Tremblay, P. (2015). The neurobiology of speech perception decline in aging. *Brain Struct Funct*, 220(2), 979-997. doi: 10.1007/s00429-013-0695-3
- Bohland, J. W., & Guenther, F. H. (2006). An fMRI investigation of syllable sequence production. *Neuroimage*, 32(2), 821-841. doi: 10.1016/j.neuroimage.2006.04.173

- Bopp, K. L., & Verhaeghen, P. (2005). Aging and verbal memory span: a meta-analysis. *J Gerontol B Psychol Sci Soc Sci*, *60*(5), P223-233.
- Borovsky, A., Saygin, A. P., Bates, E., & Dronkers, N. (2007). Lesion correlates of conversational speech production deficits. *Neuropsychologia*, *45*(11), 2525-2533. doi: S0028-3932(07)00124-8 [pii]
- 10.1016/j.neuropsychologia.2007.03.023
- Brancewicz, T. M., & Reich, A. R. (1989). Speech rate reduction and "nasality" in normal speakers. *J Speech Hear Res*, *32*(4), 837-848.
- Cacola, P., Roberson, J., & Gabbard, C. (2013). Aging in movement representations for sequential finger movements: a comparison between young-, middle-aged, and older adults. *Brain Cogn*, *82*(1), 1-5. doi: 10.1016/j.bandc.2013.02.003
- Calhoun, K. H., Gibson, B., Hartley, L., Minton, J., & Hokanson, J. A. (1992). Age-related changes in oral sensation. *Laryngoscope*, *102*(2), 109-116. doi: 10.1288/00005537-199202000-00001
- Chaput, S., & Proteau, L. (1996). Aging and motor control. *J Gerontol B Psychol Sci Soc Sci*, *51*(6), P346-355.
- Cholin, J., Levelt, W. J., & Schiller, N. O. (2006). Effects of syllable frequency in speech production. *Cognition*, *99*(2), 205-235. doi: 10.1016/j.cognition.2005.01.009
- Christou, E. A., & Enoka, R. M. (2011). Aging and movement errors when lifting and lowering light loads. *Age (Dordr)*, *33*(3), 393-407. doi: 10.1007/s11357-010-9190-4
- Clark, H. M., & Solomon, N. P. (2012). Age and sex differences in orofacial strength. *Dysphagia*, *27*(1), 2-9. doi: 10.1007/s00455-011-9328-2
- Cohen, S. M., Elackattu, A., Noordzij, J. P., Walsh, M. J., & Langmore, S. E. (2009). Palliative treatment of dysphonia and dysarthria. *Otolaryngol Clin North Am*, *42*(1), 107-121, x. doi: 10.1016/j.otc.2008.09.010
- Cousins, M. S., Corrow, C., Finn, M., & Salamone, J. D. (1998). Temporal measures of human finger tapping: effects of age. *Pharmacol Biochem Behav*, *59*(2), 445-449.
- Crow, H. C., & Ship, J. A. (1996). Tongue strength and endurance in different aged individuals. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, *51*(5), M247-250.
- D'Haeseleer, E., Depypere, H., Claeys, S., & Van Lierde, K. M. (2011). Nasal resonance in middle-aged women: a multiparameter approach. *Ann Otol Rhinol Laryngol*, *120*(9), 575-580.
- D'Haeseleer, E., Depypere, H., Claeys, S., Wuyts, F. L., Baudonck, N., & Van Lierde, K. M. (2011). Vocal characteristics of middle-aged premenopausal women. *J Voice*, *25*(3), 360-366. doi: 10.1016/j.jvoice.2009.10.016

- Decoster, W., & Debruyne, F. (1997). The ageing voice: changes in fundamental frequency, waveform stability and spectrum. *Acta Otorhinolaryngol Belg*, 51(2), 105-112.
- Dikmen, S. S., Bauer, P. J., Weintraub, S., Mungas, D., Slotkin, J., Beaumont, J. L., . . . Heaton, R. K. (2014). Measuring episodic memory across the lifespan: NIH Toolbox Picture Sequence Memory Test. *J Int Neuropsychol Soc*, 20(6), 611-619. doi: 10.1017/s1355617714000460
- Dispaldro, M., Benelli, B., Marcolini, S., & Stella, G. (2009). Real-word repetition as a predictor of grammatical competence in Italian children with typical language development. *Int J Lang Commun Disord*, 44(6), 941-961. doi: 10.1080/13682820802491794
- Dispaldro, M., Leonard, L. B., & Deevy, P. (2013). Real-word and nonword repetition in Italian-speaking children with specific language impairment: a study of diagnostic accuracy. *J Speech Lang Hear Res*, 56(1), 323-336. doi: 10.1044/1092-4388(2012/11-0304)
- Dromey, C., Boyce, K., & Channell, R. (2014). Effects of age and syntactic complexity on speech motor performance. *J Speech Lang Hear Res*, 57(6), 2142-2151. doi: 10.1044/2014_jslhr-s-13-0327
- Dronkers, N. F. (1996). A new brain region for coordinating speech articulation. *Nature*, 384(6605), 159-161. doi: 10.1038/384159a0
- Duchin, S. W., & Mysak, E. D. (1987). Disfluency and rate characteristics of young adult, middle-aged, and older males. *J Commun Disord*, 20(3), 245-257.
- Erber, J. T. (1974). Age differences in recognition memory. *J Gerontol*, 29(2), 177-181.
- Fozo, M. S., & Watson, B. C. (1998). Task complexity effect on vocal reaction time in aged speakers. *J Voice*, 12(4), 404-414.
- Gamboz, N., Zamarian, S., & Cavallero, C. (2010). Age-related differences in the attention network test (ANT). *Exp Aging Res*, 36(3), 287-305. doi: 10.1080/0361073x.2010.484729
- Gawel, M., & Kostera-Pruszczyk, A. (2014). Effect of age and gender on the number of motor units in healthy subjects estimated by the multipoint incremental MUNE method. *J Clin Neurophysiol*, 31(3), 272-278. doi: 10.1097/wnp.0000000000000066
- Genovese, C. R., Lazar, N. A., & Nichols, T. (2002). Thresholding of Statistical Maps in Functional Neuroimaging Using the False Discovery Rate. *Neuroimage*, 15(4), 870-878. doi: <http://dx.doi.org/10.1006/nimg.2001.1037>
- Gentilucci, M. (2003). Grasp observation influences speech production. *Eur J Neurosci*, 17(1), 179-184.
- Gentilucci, M., Dalla Volta, R., & Gianelli, C. (2008). When the hands speak. *J Physiol Paris*, 102(1-3), 21-30. doi: 10.1016/j.jphysparis.2008.03.002
- Goggin, N. L., & Meeuwsen, H. J. (1992). Age-related differences in the control of spatial aiming movements. *Res Q Exerc Sport*, 63(4), 366-372. doi: 10.1080/02701367.1992.10608758

- Goy, H., Fernandes, D. N., Pichora-Fuller, M. K., & van Lieshout, P. (2013). Normative voice data for younger and older adults. *J Voice*, 27(5), 545-555. doi: 10.1016/j.jvoice.2013.03.002
- Gracco, V. L. (1991). Sensorimotor mechanisms in speech motor control. In W. H. C. W. S. e. H. Peters (Ed.), *Speech Motor Control and Stuttering* (pp. 53-78). North Holland: Elsevier.
- Harada, C. N., Natelson Love, M. C., & Triebel, K. L. (2013). Normal cognitive aging. *Clin Geriatr Med*, 29(4), 737-752. doi: 10.1016/j.cger.2013.07.002
- Hartelius, L., Buder, E. H., & Strand, E. A. (1997). Long-term phonatory instability in individuals with multiple sclerosis. *J Speech Lang Hear Res*, 40(5), 1056-1072.
- Hartelius, L., Gustavsson, H., Astrand, M., & Holmberg, B. (2006). Tongue strength and speech intelligibility in oculopharyngeal muscular dystrophy. Speech Motor Control Conference Proceedings. *Journal of Medical SpeechLanguage Pathology*, 14(4), 273-277.
- Hartelius, L., Runmarker, B., & Andersen, O. (2000). Prevalence and characteristics of dysarthria in a multiple-sclerosis incidence cohort: relation to neurological data. *Folia Phoniatr Logop*, 52(4), 160-177.
- Hartelius, L., Runmarker, B., Andersen, O., & Nord, L. (2000). Temporal speech characteristics of individuals with multiple sclerosis and ataxic dysarthria: 'scanning speech' revisited. *Folia Phoniatr Logop*, 52(5), 228-238.
- Hartelius, L., & Svensson, P. (1994). Speech and swallowing symptoms associated with Parkinson's disease and multiple sclerosis: a survey. *Folia Phoniatr Logop*, 46(1), 9-17.
- Hayes, A. F. (2013). *Introduction to Mediation, Moderation, and Conditional Process Analysis: A Regression-Based Approach*: The Guilford Press
- Hazan, V., & Markham, D. (2004). Acoustic-phonetic correlates of talker intelligibility for adults and children. *J Acoust Soc Am*, 116(5), 3108-3118.
- Heft, M. W., & Robinson, M. E. (2010). Age differences in orofacial sensory thresholds. *J Dent Res*, 89(10), 1102-1105. doi: 10.1177/0022034510375287
- Hofer, S. M., & Alwin, D. F. (2008). *Handbook of cognitive aging - Interdisciplinary Perspectives* (Sage Ed.).
- Hoit, J. D., Watson, P. J., Hixon, K. E., McMahon, P., & Johnson, C. L. (1994). Age and velopharyngeal function during speech production. *J Speech Hear Res*, 37(2), 295-302.
- Honjo, I., & Isshiki, N. (1980). Laryngoscopic and voice characteristics of aged persons. *Arch Otolaryngol*, 106(3), 149-150.
- Hunter, E. J., Kapsner-Smith, M., Pead, P., Engar, M. Z., & Brown, W. R. (2012). Age and speech production: a 50-year longitudinal study. *J Am Geriatr Soc*, 60(6), 1175-1177. doi: 10.1111/j.1532-5415.2012.03983.x

- Hutchinson, J. M., Robinson, K. L., & Nerbonne, M. A. (1978). Patterns of nasalance in a sample of normal gerontologic subjects. *J Commun Disord*, 11(6), 469-481.
- Institut de la statistique du Québec. Vieillesse: réalités sociales, économiques et de santé: santé et bien-être. from <http://www.bdsso.gouv.qc.ca/docs-ken/vitrine/vieillesse/index.html?theme=sante-bien-etre&tab=4>
- Jacobs-Condit, L. E. (1984). *Gerontology and Communication Disorders* (L. Jacobs-Condit Ed.). Rockville: American Speech-Language-Hearing Association.
- Jennings, J. M., Dagenbach, D., Engle, C. M., & Funke, L. J. (2007). Age-related changes and the attention network task: an examination of alerting, orienting, and executive function. *Neuropsychol Dev Cogn B Aging Neuropsychol Cogn*, 14(4), 353-369. doi: 10.1080/13825580600788837
- Jimenez-Jimenez, F. J., Calleja, M., Alonso-Navarro, H., Rubio, L., Navacerrada, F., Pilo-de-la-Fuente, B., . . . Agundez, J. A. (2011). Influence of age and gender in motor performance in healthy subjects. *J Neurol Sci*, 302(1-2), 72-80. doi: 10.1016/j.jns.2010.11.021
- Jordan, L. C., & Hillis, A. E. (2006). Disorders of speech and language: aphasia, apraxia and dysarthria. *Curr Opin Neurol*, 19(6), 580-585. doi: 10.1097/WCO.0b013e3280109260
- Kent, R. D. (2000). Research on speech motor control and its disorders: a review and prospective. *J Commun Disord*, 33(5), 391-427; quiz 428. doi: S0021-9924(00)00023-X [pii]
- Kent, R. D., Kent, J. F., & Rosenbek, J. C. (1987). Maximum performance tests of speech production. *J Speech Hear Disord*, 52(4), 367-387.
- Klasner, E. R., & Yorkston, K. M. (2001). Linguistic and cognitive supplementation strategies as augmentative and alternative communication techniques in Huntington's disease: Case report. *Augmentative and Alternative Communication*, 17, 154-160.
- Krueger, L. E., & Weiss, M. E. (1976). Letter search through words and nonwords: The effect of fixed, absent, or mutilated targets. *Mem Cognit*, 4(2), 200-206. doi: 10.3758/bf03213164
- Law, M. (2002). Participation in the occupations of everyday life. *Am J Occup Ther*, 56(6), 640-649.
- Lexell, J. (1995). Human aging, muscle mass, and fiber type composition. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 50 Spec No, 11-16.
- Lexell, J., Taylor, C. C., & Sjöström, M. (1988). What is the cause of the ageing atrophy?: Total number, size and proportion of different fiber types studied in whole vastus lateralis muscle from 15- to 83-year-old men. *J Neurol Sci*, 84(2-3), 275-294. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0022-510X\(88\)90132-3](http://dx.doi.org/10.1016/0022-510X(88)90132-3)
- Linville, S. E. (1996). The sound of senescence. *J Voice*, 10(2), 190-200.

- Logemann, J. A., Fisher, H. B., Boshes, B., & Blonsky, E. R. (1978). Frequency and cooccurrence of vocal tract dysfunctions in the speech of a large sample of Parkinson patients. *J Speech Hear Disord*, 43(1), 47-57.
- Lortie, C. L., Thibeault, M., Guitton, M. J., & Tremblay, P. (Révisions soumises). Effects of age on the amplitude, frequency and perceived quality of voice. *Age*.
- Mahne, A., El-Haddad, G., Alavi, A., Houseni, M., Moonis, G., Mong, A., . . . Torigian, D. A. (2007). Assessment of age-related morphological and functional changes of selected structures of the head and neck by computed tomography, magnetic resonance imaging, and positron emission tomography. *Semin Nucl Med*, 37(2), 88-102. doi: 10.1053/j.semnuclmed.2006.10.003
- Markham, D., & Hazan, V. (2004). The effect of talker- and listener-related factors on intelligibility for a real-word, open-set perception test. *J Speech Lang Hear Res*, 47(4), 725-737. doi: 10.1044/1092-4388(2004/055)
- McFarland, D. H., & Tremblay, P. (2006). Clinical implications of cross-system interactions. *Semin Speech Lang*, 27(4), 300-309. doi: 10.1055/s-2006-955119
- Meyerson, M. D. (1976). The effects of aging on communication. *J Gerontol*, 31(1), 29-38.
- Morris, R., & Brown, W. S. (1987). Age-related voice measures among adult women. *Journal of voice*, 1(1), 43.
- Morris, R. J., & Brown Jr, W. S. (1987). Age-related voice measures among adult women. *Journal of Voice*, 1(1), 38-43. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0892-1997\(87\)80022-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0892-1997(87)80022-X)
- Mueller, P. B. (1997). The aging voice. *Semin Speech Lang*, 18(2), 159-168; quiz 168-159. doi: 10.1055/s-2008-1064070
- Nasreddine, Z. S., Chertkow, H., Phillips, N., Bergman, H., & Whitehead, V. (2003). Sensitivity and Specificity of The Montreal Cognitive Assessment (MoCA) for Detection of Mild Cognitive Deficits. *Can J Neurol Sci*, 30(30).
- Neel, A. T., & Palmer, P. M. (2012). Is tongue strength an important influence on rate of articulation in diadochokinetic and reading tasks? *J Speech Lang Hear Res*, 55(1), 235-246. doi: 10.1044/1092-4388(2011/10-0258)
- Nilwik, R., Snijders, T., Leenders, M., Groen, B. B., van Kranenburg, J., Verdijk, L. B., & van Loon, L. J. (2013). The decline in skeletal muscle mass with aging is mainly attributed to a reduction in type II muscle fiber size. *Exp Gerontol*, 48(5), 492-498. doi: 10.1016/j.exger.2013.02.012
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9(1), 97-113.
- Orlikoff, R. F. (1990). The relationship of age and cardiovascular health to certain acoustic characteristics of male voices. *J Speech Hear Res*, 33(3), 450-457.

- Orthophonie et Audiologie Canada (OAC). Les aînés. from <http://oac-sac.ca/public/les-a%C3%AEn%C3%A9s>
- Park, D. C., Lautenschlager, G., Hedden, T., Davidson, N. S., Smith, A. D., & Smith, P. K. (2002). Models of visuospatial and verbal memory across the adult life span. *Psychol Aging, 17*(2), 299-320.
- Parnell, M. M., & Amerman, J. D. (1987). Perception of oral diadochokinetic performances in elderly adults. *J Commun Disord, 20*(4), 339-351.
- Perry, J. L., Kuehn, D. P., Sutton, B. P., Gamage, J. K., & Fang, X. (2014). Anthropometric Analysis of the Velopharynx and Related Craniometric Dimensions in Three Adult Populations Using MRI. *Cleft Palate Craniofac J*. doi: 10.1597/14-015
- Pohl, P. S., Winstein, C. J., & Fisher, B. E. (1996). The locus of age-related movement slowing: sensory processing in continuous goal-directed aiming. *J Gerontol B Psychol Sci Soc Sci, 51*(2), P94-102.
- Preacher, K. J., & Hayes, A. F. (2004). SPSS and SAS procedures for estimating indirect effects in simple mediation models. *Behav Res Methods Instrum Comput, 36*(4), 717-731.
- Ramig, L. A. (1983a). Effects of physiological aging on speaking and reading rates. *J Commun Disord, 16*(3), 217-226.
- Ramig, L. A. (1983b). Effects of physiological aging on vowel spectral noise. *J Gerontol, 38*(2), 223-225.
- Ramig, L. O., Fox, C., & Sapir, S. (2004). Parkinson's disease: speech and voice disorders and their treatment with the Lee Silverman Voice Treatment. *Semin Speech Lang, 25*(2), 169-180. doi: 10.1055/s-2004-825653
- Reicher, G. M. (1969). Perceptual recognition as a function of meaningfulness of stimulus material. *J Exp Psychol, 81*(2), 275-280.
- Rice, C. L., Cunningham, D. A., Paterson, D. H., & Lefcoe, M. S. (1989). Arm and leg composition determined by computed tomography in young and elderly men. *Clin Physiol, 9*(3), 207-220.
- Riecker, A., Ackermann, H., Wildgruber, D., Meyer, J., Dogil, G., Haider, H., & Grodd, W. (2000). Articulatory/phonetic sequencing at the level of the anterior perisylvian cortex: a functional magnetic resonance imaging (fMRI) study. *Brain Lang, 75*(2), 259-276. doi: 10.1006/brln.2000.2356
- Rivard, J., Lortie, C., Thibeault, M., & Tremblay, P. (Soumis). The protective effect of singing on the aging voices.
- Rochet, A. P., Rochet, B. L., Sovis, E. A., & Mielke, D. L. (1998). Characteristics of nasalance in speakers of Western Canadian English and French. *Journal of Speech-Language Pathology & Audiology, 22*(2), 94-103.

- Ronnlund, M., Nyberg, L., Backman, L., & Nilsson, L. G. (2005). Stability, growth, and decline in adult life span development of declarative memory: cross-sectional and longitudinal data from a population-based study. *Psychol Aging, 20*(1), 3-18. doi: 10.1037/0882-7974.20.1.3
- Royer, F. L. (1967). Sequential complexity and motor response rates. *J Exp Psychol, 74*(2), 199-202.
- Ruiz, P. J., Bernardos, V. S., Bartolome, M., & Torres, A. G. (2007). Caput timed tests quantify age-related motor decline in normal subjects. *J Neurol Sci, 260*(1-2), 283-285. doi: 10.1016/j.jns.2007.04.034
- Ryan, W. J. (1972). Acoustic aspects of the aging voice. *J Gerontol, 27*(2), 265-268.
- Ryan, W. J., & Burk, K. W. (1974). Perceptual and acoustic correlates of aging in the speech of males. *J Commun Disord, 7*(2), 181-192.
- Sadagopan, N., & Smith, A. (2013). Age differences in speech motor performance on a novel speech task. *J Speech Lang Hear Res, 56*(5), 1552-1566. doi: 10.1044/1092-4388(2013/12-0293)
- Salthouse, T. A. (1996). The processing-speed theory of adult age differences in cognition. *Psychol Rev, 103*(3), 403-428.
- Searl, J. P., Gabel, R. M., & Fulks, J. S. (2002). Speech disfluency in centenarians. *J Commun Disord, 35*(5), 383-392.
- Seaver, E. J., Dalston, R. M., Leeper, H. A., & Adams, L. E. (1991). A study of nasometric values for normal nasal resonance. *J Speech Hear Res, 34*(4), 715-721.
- Shinkai, R. S., Hatch, J. P., Cornell, J. E., & Yeh, C. K. (2004). Intraoral tactile sensitivity in adults with diabetes. *Diabetes Care, 27*(4), 869-873.
- Shuey, E. M. (1989). Intelligibility of older versus younger adults' CVC productions. *J Commun Disord, 22*(6), 437-444.
- Shuster, L. I., & Lemieux, S. K. (2005). An fMRI investigation of covertly and overtly produced mono- and multisyllabic words. *Brain Lang, 93*(1), 20-31. doi: 10.1016/j.bandl.2004.07.007
- Smith, B. L., Wasowicz, J., & Preston, J. (1987). Temporal characteristics of the speech of normal elderly adults. *J Speech Hear Res, 30*(4), 522-529.
- Smith, C. D., Walton, A., Loveland, A. D., Umberger, G. H., Kryscio, R. J., & Gash, D. M. (2005). Memories that last in old age: motor skill learning and memory preservation. *Neurobiology of Aging, 26*(6), 883-890. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2004.08.014>
- Solomon, N. P. (2000). Changes in normal speech after fatiguing the tongue. *J Speech Lang Hear Res, 43*(6), 1416-1428.
- Stach, B. A. (2010). *Clinical Audiology: An Introduction*. Clifton Park, NY, USA: Delmar.

- Stathopoulos, E. T., Huber, J. E., & Sussman, J. E. (2011). Changes in acoustic characteristics of the voice across the life span: measures from individuals 4-93 years of age. *J Speech Lang Hear Res*, 54(4), 1011-1021. doi: 10.1044/1092-4388(2010/10-0036)
- Statistique Canada. Aînés, from <http://www.statcan.gc.ca/pub/11-402-x/2012000/chap/seniors-aines/seniors-aines-fra.htm>
- Torre, P., 3rd, & Barlow, J. A. (2009). Age-related changes in acoustic characteristics of adult speech. *J Commun Disord*, 42(5), 324-333. doi: 10.1016/j.jcomdis.2009.03.001
- Trail, M., Fox, C., Ramig, L. O., Sapis, S., Howard, J., & Lai, E. C. (2005). Speech treatment for Parkinson's disease. *NeuroRehabilitation*, 20(3), 205-221.
- Tremblay, P., & Deschamps, I. (Revisions submitted). Structural brain aging and speech production: a surface-based brain morphometry study. *Brain Struct Funct*.
- Tremblay, P., Dick, A. S., & Small, S. L. (2013). Functional and structural aging of the speech sensorimotor neural system: functional magnetic resonance imaging evidence. *Neurobiol Aging*, 34(8), 1935-1951. doi: 10.1016/j.neurobiolaging.2013.02.004
- Tremblay, P., & Gracco, V. L. (2009). Contribution of the pre-SMA to the production of words and non-speech oral motor gestures, as revealed by repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS). *Brain Res*, 1268, 112-124. doi: 10.1016/j.brainres.2009.02.076
- Tremblay, P., & Gracco, V. L. (2010a). On the selection of words and oral motor responses: evidence of a response-independent fronto-parietal network. *Cortex*, 46(1), 15-28. doi: 10.1016/j.cortex.2009.03.003
- Tremblay, P., & Gracco, V. L. (2010b). On the selection of words and oral motor responses: evidence of a response-independent fronto-parietal network. *Cortex; a journal devoted to the study of the nervous system and behavior*, 46(1), 15-28. doi: 10.1016/j.cortex.2009.03.003
- Tremblay, P., Shiller, D. M., & Gracco, V. L. (2008). On the time-course and frequency selectivity of the EEG for different modes of response selection: evidence from speech production and keyboard pressing. *Clin Neurophysiol*, 119(1), 88-99.
- Tremblay, S., Shiller, D. M., & Ostry, D. J. (2003). Somatosensory basis of speech production. *Nature*, 423(6942), 866-869. doi: 10.1038/nature01710
- Université de Lausanne. Introduction to Phonetics. from <http://www.unil.ch/sli/fr/home/menuguid/ressources/cours-et-livres-en-ligne/introduction-to-phonetics/introduction.html>
- Vandervoort, A. A. (2002). Aging of the human neuromuscular system. *Muscle Nerve*, 25(1), 17-25.
- Vanderwegen, J., Guns, C., Van Nuffelen, G., Elen, R., & De Bodt, M. (2013). The influence of age, sex, bulb position, visual feedback, and the order of testing on maximum anterior and posterior tongue strength and endurance in healthy belgian adults. *Dysphagia*, 28(2), 159-166. doi: 10.1007/s00455-012-9425-x

- Vitorino, J. (2010). Effect of age on tongue strength and endurance scores of healthy Portuguese speakers. *Int J Speech Lang Pathol*, 12(3), 237-243. doi: 10.3109/17549501003746160
- Vousden, J. I., & Maylor, E. A. (2006). Speech errors across the lifespan. *Language and Cognitive Processes*, 21(1-3), 48-77. doi: 10.1080/01690960400001838
- Waldron-Perrine, B., & Axelrod, B. N. (2012). Determining an appropriate cutting score for indication of impairment on the Montreal Cognitive Assessment. *Int J Geriatr Psychiatry*, 27(11), 1189-1194. doi: 10.1002/gps.3768
- Welch, K. C., Foster, G. D., Ritter, C. T., Wadden, T. A., Arens, R., Maislin, G., & Schwab, R. J. (2002). A novel volumetric magnetic resonance imaging paradigm to study upper airway anatomy. *Sleep*, 25(5), 532-542.
- Wenke, R. J., Cornwell, P., & Theodoros, D. G. (2010). Changes to articulation following LSVT(R) and traditional dysarthria therapy in non-progressive dysarthria. *Int J Speech Lang Pathol*, 12(3), 203-220. doi: 10.3109/17549500903568468
- Wilcox, K. A., & Horii, Y. (1980). Age and changes in vocal jitter. *J Gerontol*, 35(2), 194-198.
- Wohlert, A. B. (1996a). Perioral muscle activity in young and older adults during speech and nonspeech tasks. *J Speech Hear Res*, 39(4), 761-770.
- Wohlert, A. B. (1996b). Reflex responses of lip muscles in young and older women. *J Speech Hear Res*, 39(3), 578-589.
- Wohlert, A. B. (1996c). Tactile perception of spatial stimuli on the lip surface by young and older adults. *J Speech Hear Res*, 39(6), 1191-1198.
- Wohlert, A. B., & Smith, A. (1998). Spatiotemporal stability of lip movements in older adult speakers. *J Speech Lang Hear Res*, 41(1), 41-50.
- Yan, J. H., Thomas, J. R., & Stelmach, G. E. (1998). Aging and rapid aiming arm movement control. *Exp Aging Res*, 24(2), 155-168. doi: 10.1080/036107398244292
- Yesavage, J. A., Brink, T. L., Rose, T. L., Lum, O., Huang, V., Adey, M., & Leirer, V. O. (1982). Development and validation of a geriatric depression screening scale: a preliminary report. *Journal of psychiatric research*, 17(1), 37-49.
- Zemlin, W. R. (1998). *Speech and hearing science: anatomy and physiology* (Fourth ed.): Allyn & Bacon.
- Zraick, R. I., Smith-Olinde, L., & Shotts, L. L. (2012). Adult normative data for the KayPENTAX Phonatory Aerodynamic System Model 6600. *J Voice*, 26(2), 164-176. doi: 10.1016/j.jvoice.2011.01.006