

Université de Montréal

Liens entre les habiletés rythmiques et les compétences de décodage en lecture : Associer les périodicités oculaires au *chunking* perceptif en parole lue

Par

Antonin Rossier-Bisaillon

Département de linguistique et traduction, Faculté des arts et des sciences

Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de Maîtrise en Linguistique

Décembre 2019

© Rossier-Bisaillon, Antonin, 2019

Université de Montréal

Département de linguistique et traduction, Faculté des arts et des sciences

Ce mémoire intitulé

Liens entre les habiletés rythmiques et les compétences de décodage en lecture : Associer les périodicités oculaires au *chunking* perceptif en parole lue

Présenté par

Antonin Rossier-Bisailon

A été évalué(e) par un jury composé des personnes suivantes

Simone Falk

Président-rapporteur

Victor Boucher

Directeur de recherche

Boutheina Jemel

Codirectrice

Douglas Shiller

Membre du jury

Résumé

Plusieurs études documentent des liens entre des habiletés dans des tâches liées au rythme et certaines compétences de base en lecture. Par exemple, des corrélations significatives sont observées chez des enfants et des adolescents entre des scores en décodage de la lecture et le niveau de réussite dans des tests qui impliquent de se synchroniser à une cadence ou une séquence rythmique. De plus, il est connu que la dyslexie s'accompagne souvent de plusieurs difficultés sur le plan rythmique, et des études récentes en électroencéphalographie (EEG) et magnétoencéphalographie (MEG) ont proposé que ces lacunes soient reliées à des patrons d'activité atypiques dans les oscillations neuronales de basse fréquence du système nerveux central.

Comment expliquer que le rythme et la lecture soient ainsi liés sur le plan développemental? Dans plusieurs études, on fait référence à la conscience phonologique comme variable médiatrice pour comprendre cette association de façon indirecte. À la différence de ces théories, le présent mémoire propose une explication plus directe du lien entre rythme et lecture, dans laquelle on met l'accent sur le rôle intrinsèque du rythme pour le *chunking* d'information verbale en lecture à voix haute ou silencieuse. Pour tester cette hypothèse, on a mené une expérience durant laquelle 43 participants et participantes ont lu des textes alors que leur voix et leurs mouvements oculaires étaient enregistrés par un appareil d'oculométrie. Les résultats montrent que le rythme implicite d'un texte est suivi de façon stricte dans la lecture orale des participants, indépendamment d'amorces rythmiques auditives présentées avant le texte. De plus, certaines mesures probabilistes de fixations oculaires concordent avec ce comportement de la voix, suggérant que l'échantillonnage visuel d'un texte puisse générer une forme de comportement rythmique séquentiel. On termine en discutant des implications de ces résultats de recherche pour les théories de la lecture.

Mots-clés : rythme, lecture, *chunking*, oscillations, oculométrie.

Abstract

Numerous studies have documented links between abilities in tasks involving rhythm and some basic reading skills. For instance, significant correlations are observed between children or adolescent's reading skills and their performance on tasks on motor synchronization to an auditory cadence or rhythmic sequence. Moreover, it is known that dyslexia is often accompanied by difficulties at the rhythmic level, and recent studies in electroencephalography (EEG) and magnetoencephalography (MEG) have suggested that these deficits may result from atypical patterns of activity in low-frequency neuronal oscillations of the central nervous system.

How can these developmental links between rhythm and reading be explained? In some studies, phonological awareness is used to understand this association, hence proposing an indirect explanation relying on a third variable to make sense of the phenomenon. Unlike these theories, the present work proposes a more direct explanation of the link between rhythm and reading, where the emphasis is put on the intrinsic role of rhythm for the perceptual chunking of verbal information in oral or silent reading. To test this hypothesis, an experiment is presented in which 43 participants had to read sentences orally while their voice and eye-movements were recorded by an eye-tracking system. Results show that the implicit rhythm of the text is strictly followed in the participants' oral reading, independently of a rhythmic priming that was presented before the text. In addition, probabilistic measures of eye fixations resemble the voice's rhythmic chunks, highlighting possible rhythmic properties of visual sampling for text reading. We conclude by discussing the implications of these results for theories of reading.

Mots-clés : rhythm, reading, chunking, oscillations, eye-tracking.

Table des matières

Résumé	5
Abstract	7
Table des matières	9
Liste des tableaux	11
Liste des figures	13
Liste des sigles et abréviations	15
Remerciements	17
1. Introduction	19
1.1. Des liens développementaux entre les habiletés rythmiques et la lecture.....	19
1.2. Le rythme et ses corrélats neuronaux dans la parole.....	20
1.3. Quel rôle pour le rythme de la parole et les oscillations neuronales en lecture?	22
1.3.1. La théorie d'échantillonnage temporel : un rôle indirect du rythme.....	22
1.3.2. Quel rôle pour le rythme et les oscillations <i>durant</i> la lecture?.....	24
1.4. La présente étude.....	28
2. Article.....	31
Introduction	33
What entrains <i>during</i> reading?	34
Entrainment, sensory chunking, and the fixation-speech interval in reading	36
The present research.....	38
Method	39
Participants	39
Stimuli	39
Acoustic primes.....	39

Reading material	40
Eye-tracking and speech recording instrumentation	41
Design and procedure.....	41
Data processing and measures.....	43
Preprocessing of eye-tracking data and audio recordings.....	43
Dependent variables: eye-tracking measures	43
Dependent variable: syllable/word durations in oral recitations.....	44
Results.....	44
Discussion	52
On sensorimotor grounding during reading	54
Conclusion.....	56
References	57
Appendix 1: Lists of priming and reading stimuli	63
Appendix 2: Figures	67
3. Discussion et conclusion.....	69
3.1. Résultats de l'étude	69
3.2. Limites.....	70
3.3. Rythme et lecture : d'autres avenues pour la recherche.....	71
3.4. Conclusion.....	73
Références bibliographiques	75
Annexe 1 : Lettre d'information et formulaire de consentement	81

Liste des tableaux

Table 3. Means and standard deviation of speech onset and total sentence reading time as a function of both sentence rhythm and priming congruence (n = 43).	45
Table 4. Fixed-effects estimates of LMM for syllable duration	46
Table 5. Fixed-effects estimates of LMM for First Fixation Duration (FFD)	47
Table 6. Fixed-effects estimates of LMM for Gaze Duration (GD)	48
Table 7. Fixed-effects estimates of LMM for Probability of fixation (ProbF)	49
Table 8. Summary statistics of harmonic regression on eye-motion variables and syllable durations.	52
Table 1. List of heard utterance priming stimuli	63
Table 2. List of read sentences	64

Liste des figures

Figure 1. Time-course course of events during one experimental trial.....	42
Figure 6. Mean values and standard deviations of GD, FFD, ProbF, and syllable durations during oral recitations for sentences with regular and irregular rhythmic chunks (n = 43).	51
Figure 2. Mean values and standard deviations of syllable durations as a function of word position, sentence pattern, and congruence conditions.	67
Figure 3. Mean values and standard deviations of FFD as a function of word position, sentence pattern, and congruence conditions.	67
Figure 4. Mean values and standard deviations of GD as a function of word position, sentence pattern, and congruence conditions.	68
Figure 5. Mean values and standard deviations of ProbF as a function of word position, sentence pattern, and congruence conditions.	68

Liste des sigles et abréviations

APA : American Psychological Association

FFD : First Fixation Duration

GD : Gaze Duration

ProbF : Fixation Probability

EEG : Électro-encéphalographie

MEG : Magnétoencéphalographie

IRMf : Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle

LMM : Linear Mixed Model

GLMM : Generalized Linear Mixed Model

Remerciements

Je remercie ma famille et l'ensemble de mes proches pour leur soutien constant et leur encouragement durant la rédaction de ce mémoire.

Je remercie aussi tous les membres et collaborateurs du Laboratoire des sciences phonétiques de l'Université de Montréal pour leur aide et leur collaboration dans le cadre de ce projet.

Enfin, je remercie M. Boucher et M^{me} Jemel de m'avoir fait confiance et de m'avoir donné l'occasion de réaliser ce projet de recherche innovateur et ambitieux.

1. Introduction

1.1. Des liens développementaux entre les habiletés rythmiques et la lecture

Plusieurs études suggèrent l'existence d'un lien développemental entre les habiletés de base de décodage en lecture (p.ex. la précision et la vitesse en lecture de mots) et diverses habiletés reliées au « rythme ». Ainsi, chez des enfants anglophones de début d'âge scolaire, l'habileté à percevoir l'accent lexical, un indice acoustique qui est souvent relié au rythme de la parole en anglais, corrèle avec plusieurs mesures de décodage de mot en lecture, et ce après avoir contrôlé pour l'effet de variables médiatrices comme le niveau de vocabulaire ou le développement de la conscience phonologique (Holliman, Wood et Sheehy, 2008, 2010a, 2010b; Whalley et Hansen, 2006; Wood, 2006). De façon similaire, chez des enfants anglophones et francophones, la performance lors de tâches de synchronisation motrice à une séquence rythmique ou à une cadence régulière (p.ex. taper du doigt ou des mains au rythme d'un métronome) corrèle avec des compétences en décodage de mot (David, Wade-Woolley, Kirby et Smithrim, 2007; Dellatolas, Watier, Le Normand, Lubart et Chevrier-Muller, 2009; Douglas et Willatts, 1994; Holliman et al., 2010a; Rautenberg, 2015). De telles corrélations ont aussi été observées chez des lecteurs adolescents (Tierney et Kraus, 2013) et la performance dans le traitement de patrons temporels est reliée aux compétences en décodage chez des lecteurs adultes (Meyler et Breznitz, 2005). Dans certaines circonstances, les compétences en décodage de mot en lecture peuvent même être améliorées par une formation musicale axée sur le rythme, montrant une relation de cause à effet entre le rythme et certains aspects développementaux de la lecture (Rautenberg, 2015). Finalement, il est bien documenté que des individus présentant des symptômes de la dyslexie, un trouble d'apprentissage qui touche spécifiquement la lecture, présentent typiquement des déficits dans des tâches motrices qui impliquent le rythme ou la détection d'un accent lexical (Atterbury, 1983, 1985; McGivern, Berka, Languis et Chapman, 1991; Thomson, Fryer, Maltby et Goswami, 2006; Thomson et Goswami, 2008; Wolff, 2002), et qu'un des symptômes typiques de ce trouble tient justement dans les lacunes observées sur le plan rythmique lors de la lecture orale (American Psychiatric Association, 2013). Plus particulièrement, des études utilisant des techniques d'électro-encéphalographie (EEG) et de magnétoencéphalographie (MEG) ont permis d'identifier un corrélat neuronal spécifique aux

difficultés reliées au rythme dans la dyslexie : les individus dyslexiques présenteraient ainsi des patrons d'activité neuronale atypiques sur le plan des oscillations neuronales de basses fréquences, et ce autant en réaction au rythme de la parole (Molinaro, Lizarazu, Lallier, Bourguignon et Carreiras, 2016; Power, Mead, Barnes et Goswami, 2013) qu'en réaction à des cadences de métronome (Soltesz, Szucs, Leong, White et Goswami, 2013). Dans l'ensemble, les résultats ici présentés soulèvent des questionnements fondamentaux : comment expliquer que l'habileté dans des tâches de rythme, ainsi que des observations neurophysiologiques d'oscillations neuronales de basse fréquence, soient reliées à des compétences en lecture?

Pour offrir une piste de réponse à ces questions, ce mémoire proposera une perspective nouvelle, alimentée par des principes de *chunking* perceptif de la parole et leurs relations avec des mécanismes d'oscillations neuronales. Plusieurs concepts sont définis dans ce premier chapitre du travail, afin de mettre en contexte un article en anglais destiné à la publication, présenté dans le second chapitre. Cet article présente notamment la méthodologie et les résultats d'une expérience combinant des enregistrements acoustiques de la voix en lecture orale avec des données de mouvements oculaires. Une discussion finale présentée dans le troisième chapitre aborde les implications de ce paradigme de recherche novateur pour les théories de la lecture.

1.2. Le rythme et ses corrélats neuronaux dans la parole

Avant d'aller plus loin, il est important de préciser ce qu'on entend ici par la notion de « rythme ». Dans le cadre de ce mémoire, on se penchera avant tout sur le rythme en tant que phénomène moteur et auditif, tel qu'il est souvent évoqué pour décrire la musique ou la parole. Dans ces deux cas, on peut définir le rythme comme l'organisation d'une séquence sonore par la temporalité, l'accentuation, et le groupement, comme le propose notamment Patel (2008). Par exemple, en frappant une surface pour générer une séquence rythmique musicale, on manipulera l'intervalle temporel entre les battements, ainsi que leur accentuation les uns par rapport aux autres, afin de créer une perception de plusieurs groupements se suivant dans le temps. La parole, bien qu'elle ne respecte pas une temporalité aussi régulière, suit un principe analogue : la manipulation d'intervalles entre les syllabes, jumelée à l'accentuation de certaines syllabes par rapport aux autres, mène également à la perception de groupements qui se suivent dans le temps.

On sait que le rythme, en procurant une structure temporelle à une séquence, oriente l'auditeur à des moments plus saillants du signal. Comme le propose Kohler (2009), une variable clé pour

mesurer le rythme de la parole est la notion de proéminence acoustique. De ce point de vue, le locuteur manipule plusieurs variables acoustiques en combinaison (la fréquence fondamentale, la durée syllabique, l'intensité et l'énergie spectrale) pour que certaines syllabes deviennent plus ou moins proéminentes que d'autres, procurant une structure régulière au signal de la parole. La présence de cette structure permet à l'auditeur de générer en temps réel des prédictions quant au contenu d'un énoncé. Ce phénomène est directement observable dans des enregistrements de l'activité électrique du cerveau, grâce à des techniques d'EEG et de MEG, qui montrent que des oscillations neuronales de basse fréquence du système nerveux central sont directement entraînées par des régularités temporelles d'un signal de parole (Peelle et Davis, 2012; Schroeder et Lakatos, 2009; Schroeder, Lakatos, Kajikawa, Partan et Puce, 2008). Par exemple, ces études ont montré que l'activité oscillatoire dans la bande de fréquence *theta* (4 – 8 Hz) réagit spécifiquement à des modulations cycliques d'amplitude dans un signal de parole qui correspondent à des motions de cycles sur le plan articulatoire (Peelle et Davis, 2012), et que des oscillations *gamma* (> 40 Hz) réagissent à des indices rapides de la parole comme des transitions de formants.

À une échelle plus lente que les oscillations *theta* et *gamma*, on sait aussi qu'il existe des oscillations de plus basse fréquence de type *delta* (< 3 Hz), une bande de fréquence dans laquelle on peut probablement situer le rythme de la parole. Bien qu'il existe plusieurs propositions quant à la nature de l'unité linguistique ou prosodique à la source de ces oscillations (voir Boucher, Gilbert et Jemel (2019) pour un aperçu), plusieurs auteurs envisagent plus généralement ces oscillations comme un mécanisme d'amplification sensorielle qui oriente les ressources attentionnelles à des fenêtres temporelles précises en perception de la parole (Giraud et Poeppel, 2012; Howard et Poeppel, 2010; Lakatos, Karmos, Mehta, Ulbert et Schroeder, 2008; Schroeder, Wilson, Radman, Scharfman et Lakatos, 2010). Cette idée rejoint par ailleurs des théories dites « dynamiques » de l'attention, qui postulent que l'allocation des ressources attentionnelles opère de façon cyclique, en phase avec les stimuli temporellement structurés de notre environnement (Large et Jones, 1999). Plus récemment, néanmoins, des résultats suggèrent plus spécifiquement que l'entraînement neuronal de type *delta* en parole repose sur un couplage sensorimoteur à des groupements rythmiques (Boucher et al., 2019). Dans une étude impliquant de l'enregistrement EEG, on a présenté des séquences de tons, des syllabes sans-sens et des énoncés à des participants lors d'une tâche de rappel. Ces trois types de stimuli partageaient les mêmes groupements rythmiques (marqués par un allongement final sur une syllabe plus proéminente) et les mêmes

contours intonatifs. Des analyses des signaux EEG ont montré que la cohérence de phase inter-essai (une mesure de l'entraînement au signal) apparaît dans la bande de fréquence *delta* pour l'ensemble des stimuli langagiers, mais pas pour les séquences de tons. Ces résultats suggèrent donc que l'entraînement de phase *delta* ne soit pas élicité par de simples modulations d'amplitude ou de fréquence dans le signal de parole, mais plutôt par des marques temporelles de groupements ayant des propriétés sensorimotrices (qu'on ne retrouve pas dans des séries de tons synthétisées). En somme, il apparaît que la perception de l'organisation temporelle de la parole soit gouvernée par des mécanismes neuronaux d'oscillations fonctionnant de façon hiérarchique. Selon ce principe, différentes bandes de fréquences se rattachent à différentes unités de la parole : les oscillations *gamma* sont ainsi associées à des transitions rapides dans un signal de parole, les oscillations *theta* à des modulations acoustiques d'amplitude représentant des cycles articulatoires, et les oscillations *delta* semblent plutôt entraînées par des fenêtres temporelles qui reflètent des groupements sensorimoteurs rythmiques de la parole. Or, comme évoqué plus tôt, des populations dyslexiques montrent des patrons d'activités atypiques dans ces bandes de basses fréquences, et ceci s'observe plus spécifiquement dans les bandes de fréquences *delta* (Molinaro et al., 2016; Power et al., 2013; Soltesz et al., 2013). Pour comprendre un tel lien entre un dysfonctionnement de l'entraînement de basse fréquence à des groupements et le décodage de la lecture, certaines théories proposent des explications basées sur des principes de conscience phonologique.

1.3. Quel rôle pour le rythme de la parole et les oscillations neuronales en lecture?

1.3.1. La théorie d'échantillonnage temporel : un rôle indirect du rythme

La plupart des études développementales qui montrent des liens entre habiletés rythmiques, oscillations neuronales et compétences de décodage en lecture font référence à la « théorie d'échantillonnage temporel » (Goswami, 2011, 2017) pour expliquer les liens observés, ce qui en fait une théorie incontournable dans le contexte de ce mémoire. Cette théorie, bien qu'elle n'ait pas pour objectif premier d'éclaircir les liens entre rythme et lecture, fournit effectivement des pistes de réponse à ces questions, qui, comme on le verra, ne sont pas sans comporter leurs propres lacunes.

L'objectif fondamental de la théorie d'échantillonnage temporel est de fournir une explication neurophysiologique au développement de la conscience phonologique, soit la conscience qu'il existe des unités sonores phonologiques dans la parole qui sont associés à des unités segmentales à l'écrit (p.ex. des consonnes et des voyelles dans un alphabet) (Blachman, 2000). La conscience phonologique est communément proposée comme étant l'un des éléments fondamentaux de l'apprentissage de la lecture, puisque l'association de segments écrits à des unités de la parole est essentielle aux premières étapes du décodage en lecture (Ziegler et Goswami, 2005). Dans le cadre de la théorie d'échantillonnage temporel, il est suggéré que le corrélât neuronal principal du développement de cette habileté soit d'ordre oscillatoire. Dans une telle perspective, les mécanismes d'oscillations neuronales de basse fréquence, abordés dans la section précédente, n'auraient pas strictement une utilité pour la perception immédiate de la parole en situation de communication, mais supporteraient également une forme d'échantillonnage du signal de parole dans plusieurs fenêtres temporelles qui serait crucial au développement de représentations phonologiques pertinentes à une langue ou un système d'écriture donné (Goswami, 2011, 2017). Par exemple, pour des locuteurs d'une langue comme l'anglais, les oscillations plus lentes de type *theta* ou *delta* seraient associées à des unités phonologiques « larges » (p.ex. des syllabes ou des groupes de syllabes accentuées), et mèneraient au découpage d'unités phonologiques plus « fines » comme des consonnes ou des voyelles par des oscillations dans des bandes de fréquence *gamma*. Revenant aux interrogations sur les liens entre rythme et lecture, une conclusion logique de cette approche est que les mécanismes oscillatoires de basses fréquences supporteraient à la fois la perception du rythme de la parole (et d'autres stimuli rythmiques) et le développement de compétences de base en lecture. En proposant que les corrélats neuronaux fondamentaux du rythme et de la lecture soient les mêmes, cette théorie fournit donc une hypothèse intéressante pour expliquer leur relation étroite sur le plan comportemental.

À l'appui de cette perspective, on sait que des enfants dyslexiques de langues maternelles variées (l'anglais, le français, le hongrois, le finnois, le chinois et l'espagnol) perçoivent moins bien que des populations contrôles des modulations dans une enveloppe d'amplitude synthétisée, suggérant des déficits perceptuels généralisés dans la perception de régularités temporelles auditives (Goswami et al., 2002; Goswami et al., 2011; Hämäläinen, Leppänen, Torppa, Müller et Lyytinen, 2005; Muneaux, Ziegler, Truc, Thomson et Goswami, 2004; Surányi et al., 2009). De plus, tel que mentionné précédemment, des études en EEG et en MEG confirment que des populations

dyslexiques présentent des patrons d'entraînement atypiques à des rythmes auditifs musicaux ou de la parole, et ces déficits sont spécifiquement associés à des oscillations neuronales atypiques dans la bande de fréquence *delta* (Molinaro et al., 2016; Power et al., 2013; Soltesz et al., 2013). Cependant, malgré l'intérêt que représente la théorie d'échantillonnage temporel pour mieux comprendre le développement de la conscience phonologique, l'explication proposée des liens entre rythme et lecture demeure sommaire. Un obstacle principal concerne le lien indirect tracé entre les deux comportements. En effet, on remarquera que les liens entre rythme et lecture sont discutés de façon indirecte, puisque la conscience phonologique agit comme variable médiatrice entre les deux habiletés. À cet égard, il apparaît pertinent d'expliquer pourquoi les mécanismes d'oscillations neuronales *delta* sont spécifiquement touchés dans la dyslexie, et comment cette observation peut se rattacher à leur rôle intrinsèque *durant* la lecture, ce qu'on se propose ici d'explorer.

1.3.2. Quel rôle pour le rythme et les oscillations *durant* la lecture?

Dans les études citées jusqu'à présent, des liens entre les habiletés rythmiques et les compétences en lecture émergent lorsqu'on quantifie indépendamment la performance dans ces deux comportements. Or, d'autres études vont au-delà de ces résultats corrélationnels, en testant en temps réel des manifestations de comportements rythmiques lors du décodage oral de texte. C'est le cas d'une série d'expériences de Gould et collègues, qui ont eu recours à des amorces rythmiques auditives pour tester les effets du rythme sur la lecture orale de mots bisyllabiques (Gould, McKibben, Ekstrand, Lorentz et Borowsky, 2016; Gould, Mickleborough, Ekstrand, Lorentz et Borowsky, 2017; Gould, Mickleborough, Lorentz, Ekstrand et Borowsky, 2018). Dans ce paradigme, une courte séquence de tons est présentée avec des amplitudes variées, créant un rythme binaire similaire à un accent lexical. Ce rythme est immédiatement suivi par la présentation visuelle d'un mot écrit de l'anglais, que le participant doit lire à voix haute le plus rapidement possible. Dans ce paradigme expérimental, le mot à lire peut-être congruent ou incongruent avec la séquence auditive qui l'a précédé : par exemple, une séquence de deux tons dont le premier élément est plus fort que le deuxième serait congruent avec l'accentuation lexicale du mot *practice*, où la première syllabe est celle qui est accentuée. Dans cette expérience, les résultats montrent que cette manipulation de la congruence a un effet, puisque la vitesse de réaction tend à être plus rapide lorsque l'amorce rythmique est congruente avec l'accent lexical du mot cible. Pour aller plus loin, l'utilisation d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) lors de la tâche indique que

cet effet implique des régions sous-corticales auparavant identifiées comme étant impliquées dans le rythme et la parole (Gould et al., 2017; Gould et al., 2018). Les résultats obtenus dans cette série d'études proposent ainsi l'existence d'effets d'entraînement au rythme en lecture orale, et il est intéressant de noter que les auteurs dressent un lien avec des principes d'oscillations neuronales en lecture pour expliquer leurs résultats. Néanmoins, une telle interprétation demeure limitée pour plusieurs raisons. Premièrement, le rythme est ici défini par rapport à l'accent lexical, une propriété qui n'est pas universelle aux langues du monde (p.ex. le français, le turc, le japonais, sont des langues qui ne possèdent pas cette propriété). Relier l'entraînement d'oscillateurs neuronaux à une propriété qui est spécifique à certaines langues est problématique si l'on cherche à décrire un mécanisme neuronal ancré biologiquement. Deuxièmement, et de façon plus fondamentale, des mots courts de deux syllabes sont dépourvus des propriétés séquentielles et motrices qui définissent normalement le rythme séquentiel de la parole. En utilisant de tels stimuli de lecture, on écarte la notion de séquence rythmique se déployant dans le temps, et il est difficile de déterminer si un rythme est réellement sollicité. De plus, comme évoqué plus tôt, des résultats récents montrent que l'entraînement *delta* à des séquences verbales opère particulièrement sur les aspects sensorimoteurs du signal, et, de façon générale, la perception et la production de la parole impliquent un couplage de l'activité dans les cortex moteurs et sensoriels (Watkins, Strafella et Paus, 2003; Wilson, Saygin, Sereno et Iacoboni, 2004). Il est donc probable que des courtes séquences de tons artificiels ne provoquent pas un entraînement d'oscillations neuronales à proprement parler, mais que les résultats observés par Gould et collègues soient attribuables à une forme d'association entre une amorce et un mot lu.

Pour aborder les limites de la série d'études de Gould et collègues, on propose ici une perspective du rythme durant la lecture qui s'exerce sur des séquences plus complexes, en dressant un lien fondamental avec le concept *chunking* perceptif en parole lue. Tel qu'évoqué plus tôt, l'étude de Boucher et al. (2019) montre que l'entraînement neuronal d'oscillations *delta* émerge seulement lors de l'écoute de stimuli de parole, mais pas lors de l'écoute de tons artificiels. Plus spécifiquement, cet entraînement survient en réaction à des marques d'allongements intersyllabiques, qui sont des indices acoustiques typiques du *chunking* perceptif. À cet égard, il est essentiel de comprendre le concept de *chunking* perceptif comme un mécanisme permettant de traiter de l'information sensorimotrice séquentielle à travers le temps, comme c'est le cas dans la parole. Dans une des premières études sur le sujet, Miller (1962) observe que la perception de

séquences langagières s'exerce non pas un segment à la fois, mais par blocs, ce qui implique une forme de « mémoire tampon » de séquences sonores selon une fenêtre sensorielle bien définie. Cette fenêtre, qui reflète une limite de mémoire à court-terme sensorielle, est à la source du phénomène de *chunking* perceptif (Cowan, 2001). Ainsi, à travers plusieurs espèces, le *chunking* est marqué par un délai inter-item dans des séquences sensorimotrices (Terrace, 2001), ce qui est particulièrement observable pour le langage lors de la récitation de listes. Par exemple, lors de la lecture de listes de chiffres ou de lettres à voix haute, des participants produisent spontanément des allongements entre des items bien spécifiques, créant des groupes temporels dans la parole (Boucher, 2006; Wilkes, Lloyd et Simpson, 1972). Ce phénomène de groupement apparaît à travers plusieurs langues, indépendamment de phénomènes d'accentuation lexicale (un phénomène qui est bien illustré dans Gilbert, Boucher et Jemel (2015)). Les groupes ainsi générés reflètent la mise en mémoire d'éléments séquentiels en groupements d'unités qui ne nécessitent pas un contrôle item-par-item. Ce principe est notamment observable dans la constance temporelle des items à l'intérieur d'un *chunk*, une caractéristique qui a été attribuée à des « programmes moteurs généralisés », tel que discuté par Kelso (1997). Plus récemment, et notamment dans des paradigmes cliniques, ces *chunks* ou « blocs d'actions » ont été reliés au fonctionnement des noyaux de la base (Graybiel et Grafton, 2015).

La présence du *chunking* perceptif en lecture orale peut être illustrée par plusieurs comportements observés typiquement lors du décodage de séquences verbales à voix haute. Contrairement à la parole spontanée, une situation lors de laquelle le discours se construit au fur et à mesure, la parole lue implique des séquences strictes et prédéfinies qui sont typiquement prévisualisées avant d'être prononcées. Par exemple, on sait qu'en lecture, le délai moyen entre la perception visuelle d'un mot et sa prononciation est d'environ 500 ms, une mesure qui varie selon l'âge et le niveau de lecture et qui équivaut sur le plan spatial à environ 6,5 caractères dans un code alphabétique (De Luca, Pontillo, Primativo, Spinelli et Zoccolotti, 2013; Inhoff, Solomon, Radach et Seymour, 2011; Laubrock et Kliegl, 2015). En prévisualisant le texte tout au long de la lecture, le lecteur emmagasine donc une série de blocs d'information en mémoire avant de les prononcer, plutôt que de percevoir un mot à la fois, un comportement qui pourrait s'expliquer par des principes fondamentaux de *chunking* perceptif où on traite justement des séquences d'items en séries de blocs.

Il est plausible que le *chunking* de l'information verbale en lecture puisse s'observer au niveau de l'échantillonnage du texte, soit en observant les mouvements oculaires en lecture. À cet égard, une introduction générale au domaine d'étude de l'oculométrie s'avère nécessaire afin de clarifier les différentes composantes impliquées dans ce type d'activité motrice. Bien que l'étude des mouvements oculaires en lecture remonte à la fin du 19^e siècle, sous l'impulsion de recherches en ophtalmologie et en psychologie expérimentale (Wade, 2010), ce n'est que durant les années 1970 que le développement de techniques d'enregistrement plus sophistiquées permet à ce champ de recherche d'entrer dans une « troisième ère » dans la description des mouvements oculaires en lecture (Rayner, 1998). De façon générale, les mouvements oculaires dans des tâches cognitives comme la lecture comportent deux principales composantes : des mouvements rapides des yeux appelés « saccades » ainsi que des moments où la position des yeux reste relativement stable sur des mots, ce qu'on appelle des « fixations ». La durée des fixations, en moyenne de 225 ms en lecture silencieuse et de 275 ms en lecture orale (Rayner, 1998), est influencée par un certain nombre de facteurs. Par exemple, il existe des facteurs textuels faisant en sorte que des mots plus fréquents, plus courts et plus prévisibles tendent à être fixés moins longtemps (Kliegl, Grabner, Rolfs et Engbert, 2004), et plusieurs facteurs contextuels viennent moduler ces effets de façon inter- et intra-individuelle (difficulté du texte, niveau de lecture, etc.) (Rayner, 1998; Rayner, Pollatsek, Ashby et Clifton Jr, 2012). Néanmoins, pour les besoins de la présente étude, nous retiendrons l'influence de facteurs comme la fréquence et la longueur de mot, qui sont facilement quantifiables et documentés dans la littérature en oculométrie depuis les années 1970 (Just et Carpenter, 1980; Rayner et McConkie, 1976). Notons aussi que les mouvements oculaires en lecture sont non-linéaires, ce qui représente une différence fondamentale avec la parole. Ainsi, en lecture, on peut fixer un mot plusieurs fois, ne pas fixer certains mots, et environ 15% des saccades oculaires sont des régressions, c'est-à-dire des mouvements en sens inverse du sens de lecture d'un texte (Rayner, 1998).

Certains parallèles entre le traitement de séquences verbales acoustiques et l'échantillonnage visuel de séquences de texte permettent d'entrevoir comment le *chunking* perceptif et les oscillations neuronales pourraient se manifester en lecture. Des théories récentes suggèrent notamment que la perception de la parole et de séquences de texte partagent des périodicités similaires dans des bandes de fréquence de type *theta* (Gagl et al., 2019). Dans le même ordre d'idée, certaines théories des neurosciences ont décrit la perception visuelle par saccades comme un mode « actif » ou

« rythmique » de perception visuelle, associé à des oscillations de basses fréquences, par opposition à des tâches où la perception fonctionne de façon « continue » (Schroeder et al., 2010). Rappelons que dans ces mêmes théories, il est suggéré que la phase d'oscillations *delta* agisse comme un « amplificateur » de l'information qui tombe dans une certaine fenêtre temporelle. Néanmoins, à ce jour, aucune étude n'a cherché à décrire comment le séquençage de mouvements oculaires par groupements pourrait rendre compte d'une association entre des oscillations de basses fréquences et la lecture. Une difficulté inhérente à cette approche est que les mouvements oculaires complexes en lecture ne s'organisent pas de façon linéaire et séquentielle comme les unités cycliques de la parole. Pour remédier à ce problème, la présente étude propose d'utiliser une combinaison de données de durée de fixation et de probabilités de fixations pour évaluer le lien entre des *chunks* typiquement générés en parole et l'échantillonnage visuel de texte continu.

1.4. La présente étude

Le point de vue présenté ici entrevoit l'entraînement d'oscillations neuronales de basse fréquence comme générant une série de fenêtre perceptuelles qui permettent de percevoir des séquences verbales par blocs. Dans cette approche, on s'attend à ce que le phénomène opère directement en lien avec la séquence verbale à traiter, et ce indépendamment d'un amorçage rythmique. Dans le cas de la lecture, les fenêtres perceptuelles pertinentes apparaîtraient donc en lien avec les groupements intrinsèques d'un texte lors de son décodage. Dans cette perspective, l'hypothèse est que le *chunking* de la parole en lecture orale ne soit pas affecté par différents types d'amorce rythmiques précédant la lecture, mais suive plutôt de façon stricte la prosodie implicite d'un texte lu. De plus, on s'attend également à ce que les mouvements oculaires lors de la lecture reflètent un tel processus de segmentation lorsqu'on observe ces mouvements à l'échelle d'une séquence de phrase complète. Pour clarifier les variables impliquées dans l'évaluation de cette hypothèse, les paragraphes suivants résument les deux objectifs de l'expérience qui sera présentée.

Les amorces acoustiques utilisées lors de cette expérience comprennent des séquences de tons, de syllabes sans sens et d'énoncés utilisés dans une expérience précédente (Boucher et al., 2019). Dans ces stimuli, les intervalles inter-items marquent des *chunks* rythmiques, et ces propriétés ont entraîné des oscillations *delta* spécifiquement pour les séquences verbales. Les stimuli présentent également des rythmes réguliers et plus irréguliers qui peuvent correspondre ou non au rythme d'une phrase lue subséquentement. En utilisant des logiciels d'analyses spécialisés, les délais inter-

syllabiques lors de la lecture orale de participants sont mesurés et comparés en fonction de conditions de congruence avec les amorces rythmiques. De façon générale, on s'attend à ce que la rythmique implicite des phrases lues soit respectée, et que la congruence ne vienne pas non plus interférer avec le temps de lecture.

La deuxième prédiction, plus spécifique à cette étude, est que certaines variables oculaires reflèteront directement les mécanismes de *chunking* perceptif de la parole. Pour répondre à ces questions, on utilise deux variables de durée de fixations (la durée des fixations initiales sur des mots et la durée totale des fixations lors du premier passage sur un mot) et une variable de probabilité de fixation, qui est indépendante des durées de fixation. En utilisant cette dernière variable, on diminue les effets de non-séquentialité des mouvements oculaires en calculant des valeurs moyennes de probabilités de fixations sur chaque mot. De plus, l'utilisation de lexèmes écrits qui correspondent à des mots monosyllabiques du français permet de faciliter le parallèle entre la parole et le découpage visuel.

Pour vérifier ces hypothèses, on a enregistré la voix et les mouvements oculaires de quarante-cinq participants locuteurs natifs du français durant une tâche de lecture de phrases simples. Toutes les personnes ayant participé à cette expérience ont signé un formulaire de consentement et le protocole de recherche a été approuvé par le Comité d'éthique de la recherche en arts et en sciences de l'Université de Montréal.

2. Article

L'article présenté dans cette section comprend les données d'une expérience conçue et réalisée par Antonin Rossier-Bisaillon, sous la supervision de Victor J. Boucher (Département de linguistique et de traduction, Université de Montréal) et de Boutheina Jemel (École d'orthophonie et d'audiologie, Université de Montréal). Un quatrième auteur, Philippe Martin (Université Paris Diderot-Paris 7), a contribué à la préparation des données acoustiques, grâce à un script automatisé sur le logiciel WinPitch.

Il est important de noter que certains passages de l'article reprennent de l'information exposée dans l'introduction et la discussion de ce mémoire, ce qui peut résulter en un certain dédoublement d'information. Les figures et tableaux ont été insérées dans le corps du texte pour faciliter la lecture. De plus, la lettre d'information et le formulaire de consentement mentionnés dans la méthodologie sont présentés respectivement dans les Annexes 1 et 2 du présent document. Mentionnons finalement que cet article sera soumis à la revue *Psychological Science*.

Why does the tracking of rhythm influence reading?

Linking eye movements and chunking in text recitation

Introduction

A body of work has revealed an intriguing relationship between children's reading skills and their ability to tap to heard beats (David, Wade-Woolley, Kirby, & Smithrim, 2007; Dellatolas, Watier, Le Normand, Lubart, & Chevrie-Muller, 2009; Douglas & Willatts, 1994; Holliman, Wood, & Sheehy, 2010a; Rautenberg, 2015). Although less documented, these correlations also emerge in adolescent populations (Tierney & Kraus, 2013) and there are links between temporal pattern processing and word decoding skills in adult populations (Meyler & Breznitz, 2005). These observed relationships also extend to the reproduction of rhythmic aspects of speech. For instance, several studies have shown that children's capacity to detect word stress in English, constitutes a strong predictor of developing reading proficiency as indexed by reading accuracy and speed, even after controlling for vocabulary level (Holliman, Wood, & Sheehy, 2008; Holliman et al., 2010a; Holliman, Wood, & Sheehy, 2010b; Whalley & Hansen, 2006; Wood, 2006). Conversely, poor performance on tasks of rhythm or stress detection has been repeatedly reported for reading-impaired children presenting a developmental dyslexia (Atterbury, 1983, 1985; McGivern, Berka, Languis, & Chapman, 1991; Thomson, Fryer, Maltby, & Goswami, 2006; Thomson & Goswami, 2008; Wolff, 2002), and this disorder is also associated with poor rhythmicity when reading aloud (American Psychiatric Association, 2013). In recent research, many authors interpret these converging results on rhythm perception as reflecting an underlying neural tracking of periodic attributes of sounds and speech.

In particular, studies using electro- and magneto-encephalography (EEG, MEG) have confirmed that individuals with a developmental dyslexia show atypical neural oscillations in the delta band (.5 – 3 Hz) in response to both heard speech rhythm (Molinaro, Lizarazu, Lallier, Bourguignon, & Carreiras, 2016; Power, Mead, Barnes, & Goswami, 2013) and periodic acoustic beats (Soltesz, Szucs, Leong, White, & Goswami, 2013). Although this finding constitutes a major advance in research on dyslexia, it is also inherently puzzling in that low-frequency oscillations or the ability to tap out rhythms present no obvious link with reading.

Part of the issue is that the above research largely rests on correlations with respect to various measures of reading proficiency. These measures do not serve to link neural waves to reading processes like text scanning and recitation. One attempt to clarify this link is Goswami's "temporal sampling theory" (Goswami, 2011, 2017), where the sensory entrainment of neural waves is seen as a pivotal principle in the emergence of phonological awareness. Yet the theory bears primarily on associations between entrainment on theta-band oscillations and measures of children's phonological awareness (for a similar perspective, cf. Tierney and Kraus (2014)). In a related time-sampling view that bears more directly on the scanning and recitation of text, Gagl et al. (2019) report that, across languages, syllable rates and fixation durations in reading present similarities which suggest that both speech and text are sampled at a rate of about 5 Hz corresponding to endogenous theta oscillations. These proposals, however, do not address the function of lower-frequency delta entrainment during reading. Given the above clinical findings, circumscribing the sensory attributes that can entrain these waves appears central to an understanding of their role in the reading process.

What entrains *during* reading?

In defining relevant sensory elements that have entraining effects, the above reports relating delta waves to reading ability (or dysfunction) narrow the search to periodic attributes of .5 to 3 Hz. In line with this range of values, it was noted that several studies have focused on correlations between children's capacity to detect rhythms of word stress and measures of reading proficiency. In contrast to these indirect measures, some recent studies involving adult readers and neuroimaging have examined the effects of priming stress rhythms in the oral reading of words. This is the case of a series of reports by Gould and colleagues (Gould, McKibben, Ekstrand, Lorentz, & Borowsky, 2016; Gould, Mickleborough, Ekstrand, Lorentz, & Borowsky, 2017; Gould, Mickleborough, Lorentz, Ekstrand, & Borowsky, 2018). In these investigations, a priming paradigm and a monitoring of neural activity served to assess the influence of rhythmic primes on the reading of isolated words aloud. The primes consisted of tones with amplitude variations that simulated weak-strong and strong-weak patterns of English word stress. These primes were followed by visual presentations of two-syllable words with congruent or non-congruent stress patterns. In such tasks, response times are usually shorter when the prime is congruent with the target item (other factors of congruency such as the semantic-grammatical class of words were also examined in the reports). The results showed congruency effects, and analyses of brain responses via functional magnetic

resonance imaging (fMRI) revealed that rhythmic priming associated with activity in a vast network of structures, including subcortical regions (Gould et al., 2017; Gould et al., 2018). In sum, the studies suggested that the priming of stress rhythms influenced the reading of isolated words. The authors remarked that these priming effects could owe to the entrainment of neural oscillations, although the reports did not involve observations supporting this interpretation. On the other hand, these reports along with previously cited studies collectively rest on the assumption that speech “rhythm” associates with word stress. It is further presumed that an acoustic priming of stress patterns has entraining effects on neural oscillations and word reading. These two assumptions are inherently problematic.

On equating rhythm with word stress, it is difficult to see how low-frequency oscillations would singularly entrain to stress patterns. As should be noted, stress rhythms like those of English are language-specific. There are languages that do not have lexically encoded stress (e.g., French, Turkish, Japanese). Given that neural waves are biologically grounded, their entrainment is likely to relate to more general sensory marks than stress marks. This is not a trivial point. If dyslexia associates with abnormalities in delta entrainment, then this may not be related to a deficient tracking of word stress unless one is willing to claim that dyslexia is language-specific.

But there is a more basic problem in assuming that neural entrainment in oral reciting of single words can be entrained by short series of tones and noises, as opposed to articulated sounds of speech. Perception and production of speech is known to involve a coupling of activity in speech motor and sensory cortices (e.g. Watkins, Strafella, and Paus (2003) or Wilson, Saygin, Sereno, and Iacoboni (2004)). Yet this motor-sensory coupling would not operate for artificial tones or noises. Moreover, even if one uses speech as stimuli, it needs to be asked whether entrainment is effectively occurring for the reading of two-syllable words that do not possess the complex sequential properties of continuous speech, using primes that occur before recitations of text. Said differently, it has been assumed in some investigations that effects of rhythm priming on a subsequent recitation of text reflects neural entrainment. However, it should be asked if entrainment is even possible between short events that are, moreover, temporally delayed from one another (asynchronous).

On the effects of different types of stimuli that synchronize with neural oscillations, a recent study has revealed that low-frequency delta waves entrain to particular marks in speech but not in tones

(Boucher, Gilbert, & Jemel, 2019). The study in question made use of different stimuli: listeners were presented with sequences of tones, nonsense syllables, and utterances all with similar timing and pitch. Measures of inter-trial phase coherence showed an entrainment of delta oscillations only for speech sounds (nonsense syllables and utterances). In other words, low-frequency neural entrainment appeared for articulated sounds bearing inherent motor information for listeners, and not for melodic tones where such information is absent. More importantly, the entrainment occurred on characteristic marks of “sensory chunking”. These results conform to the idea expressed in a number of reports that entrainment of neural oscillations basically establishes sensory processing frames (Giraud & Poeppel, 2012; Howard & Poeppel, 2010; Lakatos, Karmos, Mehta, Ulbert, & Schroeder, 2008). It is the view in the present report that the chunking of verbal information in text presents a mechanism that can define a link between rhythm, low-frequency neural oscillations and reading.

Entrainment, sensory chunking, and the fixation-speech interval in reading

To briefly clarify the previous point, it is essential to mention that sensory chunking applies in processing sequential motor-sensory information that unfolds over time, as is the case of speech. Miller (1962) was perhaps the first to note that listeners do not process speech one segment or one syllable at a time but in blocks, implying a buffering of sound sequences over a sensory frame. This frame, which can reflect the span of sequence memory, underlies sensory chunking (Cowan, 2001). Across species, chunking is generally marked by inter-item delays in sensorimotor sequences (Terrace, 2001), and these marks are readily observed in common tasks of list recitation. For instance, in reading lists of numbers or letters aloud, inter-item delays spontaneously arise creating groups (Boucher, 2006; Wilkes, Lloyd, & Simpson, 1972). This grouping phenomenon appears across languages regardless of word stress (see Gilbert, Boucher, and Jemel (2015) for illustrations of this principle). In fact, in the oral reading of visual lists, chunks or groups appear independently of external cues in the presented lists. It is also important to note that the groupings reflect a buffering of sequential elements in coherent units which, when produced, do not require an element-by-element control. This is seen in the degree of relative-timing constancy of elements within learned or recited chunks, a characteristic which has been variably attributed to “generalized motor programs” and “central pattern generators” (discussed in Kelso (1997)). In more recent

research, including clinical reports, these self-adjusting “blocks of action” have been linked to the workings of the basal ganglia (for a review, see Graybiel and Grafton (2015)).

How the above chunking principle relates to reading can be illustrated by reference to typical behaviors of oratory text recitation. When reading aloud to someone, individuals occasionally glance at listeners while they continue to recite a text. For this to be possible, readers need to momentarily store a block of verbal material which can be recited while attention is directed elsewhere (to listeners, to fall points on a text, etc.). Sensory chunking presents a mechanism that can account for this behavior. A reader’s gaze (and attention) can depart from a text at intervals, specifically at points when buffered sequences can be “offloaded” as self-executing blocks that do not require a moment-by-moment control. As the buffer empties, the reader returns to the text in performing another text-to-speech conversion. Currently, it is not known how chunking or the short-term buffering of verbal material operates during this conversion process. Recent reports indicate that, in reading, the average delay between the onset of a fixation and the onset of recitation is 500 ms, equivalent to 6.5 character spaces (Inhoff, Solomon, Radach, & Seymour, 2011; Laubrock & Kliegl, 2015). These values are typically smaller for dyslexic readers, suggesting a “word-by-word” decoding process which may account for poor prosody when reading aloud (De Luca, Pontillo, Primativo, Spinelli, & Zoccolotti, 2013). Overall, the implication is that the text-to-speech conversion of entire blocks of verbal material is quite rapid. But it is also known that fixations of blocks of text items do not occur sequentially like speech sounds in recitations. They do not occur one visual item after another. There are refixations, skipped items or regressions, all of which can obscure effects of chunking in the text-to-speech conversion process. One way to avoid this when analyzing eye movement sequences may be to use probabilistic counts of the fixations on text items (as used by Rayner, Ashby, Pollatsek, and Reichle (2004), Rayner, Schotter, and Drieghe (2014), or Laubrock and Kliegl (2015), among many others). Probabilistic counts of fixations in relation to sequences of text items present a different approach from measures of fixation-speech interval or fixation duration. They can capture, in reading an extent of text, the process of converting visual to spoken items inasmuch as units of text can correspond to units of speech such as syllables. This has been an issue in reading research where text stimuli are not systematically controlled with respect to numbers of speech units (and prosodic groups). The following study made use of text material where space-divided word items in sentences are all monosyllables. Probabilistic counts of fixations as the eyes move back and forth on these visually

segregated units can provide a window on the buffering of information in chunks as the units are converted to speech units in oral recitation. Other typical measures of eye fixation are also considered in relation to these item-based measures: first fixation duration (FFD), which is the duration of the initial fixation on a word, and gaze duration (GD), which represents the sum of all first-pass fixations on a word.

The present research

In the above view, low-frequency neural oscillations entrain to sensorimotor sequences, such as speech sounds, and creates processing frames associated with sensory chunking. But neural entrainment and chunking in reading may not necessitate external cues such as acoustic primes to emerge. As noted, common observations show that grouping patterns arise in the recitation of visual lists, which suggests that such chunking is involved in converting text to spoken sequences. In this light, the hypothesis is that chunking in the recitation of text is unaffected by different priming stimuli (speech, tones, noise) and that such grouping, marked by inter-item delays, reflects in probabilistic counts of fixations rather than their durations. To clarify the variables involved in evaluating this two-part hypothesis, the subsequent paragraphs summarize the rationale of the present investigation.

The acoustic primes used in the current experiment all reflect sentence-length stimuli given that low-frequency entrainment and chunking can extend beyond individual words or syllables. These primes comprise the tones, nonsense syllables, and sentences used in a previous report where inter-item delays marking chunks in verbal sequences were shown to entrain delta waves (Boucher et al., 2019). The stimuli also contain regular and irregular delays heard as varying rhythms just before participants recite displayed sentences. However, the structure of these sentences is such that their recitation entails the production of rhythms which are congruent or non-congruent with the primes. Using specialized software, inter-syllable delays are measured in the recitations and the expectation is that sentences will be recited with regular or irregular delays independently of their congruency with preceding primes.

The second and more central prediction is that the inter-item delays marking chunks in oral recitations will correspond to either changes in fixation duration measures (FFD, GD) or the probability of fixations of text units defined as space-divided monosyllabic words. As mentioned,

using these visually segregated units that also reflect speech units (syllables) facilitates observations of chunking during the text-to-speech conversion process.

Method

Participants

Taking part in the experiment were 45 native speakers of French (21 males) aged between 18 and 34 years ($M = 24.67$; $SD = 3.87$). All were university students who reported no history of reading difficulties or deficits in hearing. The reading proficiency and cognitive skills of the participants was assessed using subsections of ÉCLA 16+, a standardized test battery for French-speaking adults (Gola-Asmussen, Lequette, Pouget, Rouyer, & Zorman, 2011). For the purposes of the present study, a subset of six memory- and reading-oriented tests were selected from ÉCLA 16+. The scores on subtests of reading speed and accuracy showed normal proficiency in terms of standardized scales, and all individuals performed normally on tests of memory span. In the course of the experiment, the calibration of eye motions was not possible for two participants, which were excluded, leaving 43 who completed the tasks. All volunteers in the present study signed a consent form and the protocol followed the guidelines of the University of Montreal's *Comité d'éthique de la recherche en arts et en sciences*.

Stimuli

Acoustic primes

As mentioned, the primes consisted of sequences of tones, nonsense syllables, and utterances taken from a previous experiment (for details of the acoustic properties of these contexts, see Boucher et al. (2019)). Each of these primes contained twelve syllables or syllable-size tones with similar timing, intonation, and overall duration (2.86 sec.). It should be noted that the verbal primes reflect naturally spoken contexts and that a control of temporal and intonational attributes involved a pacing technique (Gilbert, Boucher, & Jemel, 2014). Chunks in these stimuli are delimited by group-final inter-item delays that are about 1.8 times longer than non-final items, reflecting typical values observed in speech (Fant, Kruckenberg, & Nord, 1991). The delays marked either “regular” or “irregular” rhythms: regular patterns comprised sequences with four chunks of three syllables or syllable-size tones; irregular patterns presented four chunks, two containing four syllables or

tones, and two containing two syllables or tones (with a distribution of 4422, 4242, 2244, 2424, 2442, and 4224). For the utterance primes, the first chunk always contained the subject and verb, and was followed by three complement clauses (e.g. *Il les compte / un à un / dans sa main / en silence.*). A complete list of the utterance primes used (a total of 24 sentences) is included in Table 1 of Appendix 1. Overall, a grand total of 72 primes were used, 12 for each of the 6 blocks equally representing conditions of type of prime (tones, syllables, utterances), rhythm pattern (regular and irregular), and congruency vs non-congruency with written sentences used in the recitations. Additionally, 12 primes consisting of a white noise of 2.86 sec. were used as a baseline in comparing effects of the three types of priming contexts.

Reading material

Matching the number of primes (including those used as a baseline), 84 written sentences were constructed as the main contexts for the oral reading task. Each of these sentences contained 12 space-divided monosyllabic words and their syntax was designed so that the reader would tend to produce regular or irregular temporal chunks, like the primes. To achieve this, the first syntactic clause always contained the subject and verb and was followed by three complement clauses. In reading these contexts aloud, the boundaries of the clauses generally created inter-syllable delays at designated points (e.g. *Le feu prend / pour un rien / dans la brousse / par temps sec.*). A complete list of the reading materials used (a total of 84 sentences) is included in Table 2 of Appendix 1. Textual frequencies for the common lexemes of the sentences were estimated by reference to the WorldLex database (<http://www.lexique.org/>), which provides frequency indices based on digital media (news, blogs, and twitter; by Gimenes and New (2016)). Median frequency of the lexemes in the presented sentences was of 1082 occurrences per million, which corresponds to the word *temps* (time), and the range varied between 0.44 and 43 486 occurrences per million, for the words *gicle* (spurt) and *de* (of) respectively. In terms of letter counts, space-divided words averaged 3.70 characters (SD = 1.48) and sentence length including spaces averaged 56.36 characters (SD = 2.95). The text was displayed in a 20 points monospaced Courier New font such that, at an eye-to-screen distance of 63 cm, 1° of visual angle contained approximately 2.1 character spaces, and full view of a sentence covered 23.48° to 30° of visual angle.

Eye-tracking and speech recording instrumentation

Sentences were displayed on a CRT computer monitor (ViewSonic, G225f) with a resolution of 1280 x1024 pixels and an 85 Hz refresh rate, while acoustic primes were delivered through circumaural headphones (Beyerdynamic, DT250) at peak volumes of 65 dBA at the ears (as measured with a sonometer and adapter). The presentation of the primes and written sentences were controlled by software (Experiment Builder, version 2.1.140, SR Research), which also served to record eye-movements and voice during the recitations of sentences. The latter were recorded using an omnidirectional microphone (Audio Technica, AT803) connected to an ASIO-compatible sound card (SoundBlaster Audigy 2 ZS, Creative Technology). Audio-signals were digitized at a 24 kHz sampling with 16-bit resolution and stored in .wav format. As for eye movements, these were recorded at a 1 kHz sampling rate via a table-mounted system (EyeLink 1000, SR-Research). During these recordings, the participant's head was stabilized at 63 cm from the screen by way of a headrest placed on the forehead. To allow for the movement of the jaw during the oral recitations, the chinrest was removed from the headrest and the non-constraining frame placed on the forehead was sufficient in stabilizing the head throughout the experiment. Finally, the eye-tracking apparatus was calibrated using a standard 9-point method at the start of each block.

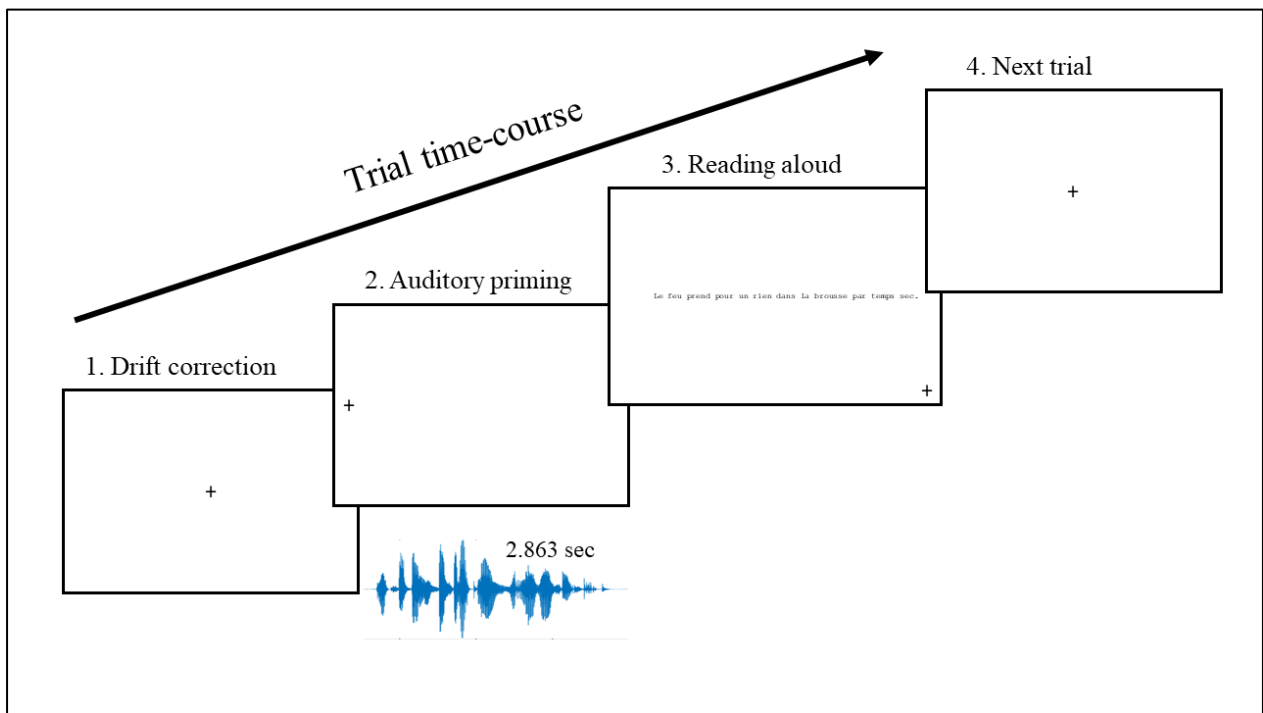
Design and procedure

The experiment was performed in a closed sound-treated room with the experimenter giving oral instructions on tasks to be performed on blocks of trials. The first block consisted of the baseline condition trials, followed by the six blocks of experimental trials. Prior to the baseline block and the first of the experimental trials, participants were given three practice trials with different rhythmic patterns. Following this practice, trial presentation order within a block was randomized across participants by way of customized scripts of the presentation toolbox. Between each of the blocks, the participant was presented with a task from the ÉCLA 16+ battery (see the reference in the "Participants" section). This served to distract attention from the heard and recited rhythms. Overall, the presentations of written sentences and primes was exactly balanced in that there were 4 trials of sentence recitations per level of each condition of "type of prime" (nonsense syllables vs utterances vs tones), and there were 6 trials of sentence recitations per level of each condition

of “rhythm pattern” (regular vs irregular) and “congruency with prime” (congruent vs non-congruent).

In the test, each trial involved brief automated corrections just before the recording of eye motions. Specifically, each trial began with the participant focusing on a point at the center of the screen which allowed a standard drift correction. Following this correction, a small cross appeared on the left side of the screen, at 15.52° from the screen center. A fixation of this cross triggered the start of the acoustic prime. The participant was instructed to keep fixating the cross while attentively listening to the sound. Immediately at the end of the sound, the sentence appeared at 2.05° to the right of the cross. The participants were instructed to read the sentence aloud at a fast pace while avoiding errors. The trial ended when the participant fixated another cross in the lower right corner of the screen, triggering a short pause before the following trial. To exemplify these different steps, the time-course of one trial is illustrated in Figure 1.

Figure 1. Time-course course of events during one experimental trial



Data processing and measures

Preprocessing of eye-tracking data and audio recordings

Visual inspection of the eye-motion data was performed using Data Viewer (version 1.11.900, SR-Research) and Matlab (version 9.6, Mathworks). Corrections were applied to slight drifts outside of interest areas and refixations on sentences after fixating the bottom cross. With these corrections, the raw data of eye motions within the areas of interest represented 41,417 fixations. In further step of preprocessing, individual fixations of less than 80 ms and that were within a one-character distance to another fixation were merged as a single data point. Remaining fixations shorter than 80 ms or longer than 1200 ms were eliminated. This left 40,627 fixation points (790 or 1.91% of fixations were deleted or merged). From these data, 545 trials were discarded due to a lack of fixations (less than four on a sentence, or no fixations on three subsequent words) or reading errors (e.g., wrong words, repetitions of sentence parts, self-corrections, etc.), which left a total of 3,067 valid trials of sentence recitation containing 33,986 fixation points.

Acoustic measures of syllable timing for these 3,067 sentences were performed using an automated procedure implemented in the software WinPitch (version W10, Pitch Instruments Inc.). This software uses a phonetic transcription as a guide in isolating syllable onsets in speech signals. Inspection of the totality of segmentations performed by this system showed errors on a small subset of 25 trials. For these cases, the segmentation of syllable onsets was performed manually using Praat (Boersma, 2001).

Dependent variables: eye-tracking measures

Three measures of eye-movements were used including first fixation duration (FFD, the duration of the initial fixation on a word), gaze duration (GD, the total duration of first-pass fixations on a word), and probabilities of fixations (ProbF). For the calculation of the FFD, only the duration of the initial fixation on a word is considered. Therefore, even if the word was re-fixated a certain number of times, these values were not weighed in the FFD measure. By contrast, GD considers all first-pass refixations on a word if it received multiple fixations before moving elsewhere in the text. If a word is returned to after the eyes have moved elsewhere in the text, these fixations are not considered in the calculation of GD. ProbF are counts of whether a word was fixated (count 1) or not (count 0) regardless of durations. In all cases, second-pass fixations on words are not considered in the present analyses.

Dependent variable: syllable/word durations in oral recitations

Syllable durations in the recitations as measured automatically by the WinPitch system bore on the delays between the onsets of syllables, which also reflected the monosyllabic words. It should be noted that this output included a measure of syllable duration for the final or twelfth syllable of recited sentences where the system provided a measure based on the sentence-final sound offset (Martin, 2019). In these analyses, increase in inter-syllable delays marks the ends of groups or chunks. Moreover, this method also provided variables of speech onset (the interval between the visual presentation of the sentence and the acoustic onset of speech) and total sentence reading time (the interval between the acoustic onset of speech and the sound offset of the last syllable).

Results

An initial step of the analyses focused on determining whether speech onsets and total sentence reading times were similar across conditions. Table 3 presents summary statistics of these trial-level variables. For baseline trials, a one-way ANOVA on sentence rhythm (regular vs irregular) showed no effect of this variable on speech onset [$F(1,83) = 0.021$, $MSE = 17068.72$; $p = 0.884$, $\eta^2 = 0.00$] or total reading times [$F(1,83) = 0.213$, $MSE = 136329.2$; $p = 0.645$, $\eta^2 = 0.003$]. In the case of primed trials, a two-way repeated-measures ANOVA on congruency (congruent vs incongruent) and sentence rhythm (regular vs irregular) also showed no significant variation. Specifically, for speech onsets, there were no main effects of congruency [$F(1, 168) = 0.003$, $MSE = 14064.93$; $p = 0.957$, $\eta^2 = 0.00$] or sentence rhythm [$F(1,168) = 0.005$, $MSE = 14064.93$; $p = 0.943$, $\eta^2 = 0.00$], and no significant interaction [$F(2,168) = 0.151$, $MSE = 14064.93$; $p = 0.698$, $\eta^2 = 0.001$]. The same was true for sentence reading times: there were no main effects for either congruency [$F(1, 168) = 0.062$, $MSE = 105920.6$; $p = 0.803$, $\eta^2 = 0.00$], or sentence rhythm [$F(1,168) = 0.679$, $MSE = 105920.6$; $p = 0.411$, $\eta^2 = 0.004$], and no interaction [$F(2,168) = 0.074$, $MSE = 105920.6$; $p = 0.786$, $\eta^2 = 0.00$]).

Table 3. Means and standard deviation of speech onset and total sentence reading time as a function of both sentence rhythm and priming congruence (n = 43).

Priming congruence	Sentence rhythm	
	Regular	Irregular
<i>Speech onset (ms)</i>		
Baseline	727 (147)	726 (151)
Congruent	719 (154)	724 (143)
Incongruent	727 (152)	724 (152)
<i>Total sentence reading time (ms)</i>		
Baseline	2544 (436)	2585 (431)
Congruent	2464 (410)	2506 (419)
Incongruent	2468 (409)	2525 (429)

In terms of the central effects of priming and several secondary variables characterizing the presented sequences, an extensive analysis was performed using linear mixed models (LMM) and generalized linear mixed models (GLMM) with R packages lme4 (Bates, Mächler, Bolker, & Walker, 2014) and lmerTest (Kuznetsova, Brockhoff, & Christensen, 2017). Models were tested for baseline and experimental trials separately, using the three eye-movement variables (FFD, GD, ProbF) and the variable of inter-syllable duration as the outputs. Participant identity was used as a random effect. For eye movement variables, control fixed effects included word frequency and word length in specific polynomial trends, in line with studies by Kliegl and colleagues using (G)LMMs to study eye-movement output variables (Heister, Würzner, & Kliegl, 2012; Laubrock & Kliegl, 2015). Test fixed effects included priming congruency along with sentence regularity and word position. Priming congruency and sentence regularity were both two-factor categorical variables in the models. Word position, on the other hand, was treated as a continuous variable ranging from 1 to 12 and was tested along linear and quadratic trends to examine the possibility of non-linear relationships with the outcome variable. It should be mentioned that, for ProbF, the output variable is dichotomous, such that a word is fixated (count 1) or not (count 0). Hence, for this specific case, a GLMM logistic regression was used, which allowed to predict a binomial outcome. The results for each of the dependent variables of syllable duration, GD, FFD, and ProbF are presented separately in the following tables.

Table 4 presents the LMM estimates of a parametrized model for the output variable syllable durations. Using likelihood-ratio tests, it was found that adding fixed effects and their interactions

to a null model significantly increased the fit for both the baseline [$\chi^2(5) = 140.49, p < 0.001$] and the experimental trials [$\chi^2(11) = 723.62, p < 0.001$]. Word position presents a significant effect, which was modulated by sentence regularity, as shown by the interactions for the baseline and experimental trials. The model also revealed a significant quadratic interaction of word position and congruency.

Table 4. Fixed-effects estimates of LMM for syllable duration

Fixed Effects	Syllable duration in:							
	Baseline trials				Experimental trials			
	<i>b</i>	<i>SE</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>b</i>	<i>SE</i>	<i>t</i>	<i>p</i>
(Intercept)	216.306	4.695	46.07	< 0.0001	208.980	4.129	50.61	< 0.0001
Regularity	-2.474	2.743	-0.90	0.367	-2.620	1.547	-1.69	0.090
Congruence	-	-	-	-	1.842	1.550	1.19	0.235
Word position (linear)	1194.911	141.193	8.46	< 0.0001	2917.550	194.247	15.02	< 0.0001
Word position (quadratic)	787.101	141.193	5.58	< 0.0001	816.567	194.247	4.20	< 0.0001
Regularity × Congruence	-	-	-	-	-1.711	2.186	-0.78	0.434
Regularity × Word position (linear)	-405.891	199.007	-2.04	0.041	-1055.240	273.976	-3.85	< 0.0001
Regularity × Word position (quadratic)	-410.826	199.007	-2.06	0.039	-104.781	273.976	-0.38	0.700
Congruence × Word position (linear)	-	-	-	-	-0.460	274.497	0.00	0.999
Congruence × Word position (quadratic)	-	-	-	-	549.221	274.497	2.00	0.045
Regularity × Congruence × Word position (linear)	-	-	-	-	-114.602	387.165	-0.30	0.767
Regularity × Congruence × Word position (quadratic)	-	-	-	-	-568.413	387.165	-1.47	0.142
Random Effects	Variance			Variance				
	Intercept	Slope		Intercept	Slope			
Participants	782.8	-		681.4	-			
Residual	9900.5			9368.2				

Table 5 presents the LMM estimates for the output variable FFD. Again, using a likelihood-ratio approach, it was found that adding fixed effects and their interactions to a null model with control variables of word frequency and word length significantly increased the fit for both the baseline [$\chi^2(5) = 158.36, p < 0.001$] and the experimental trials [$\chi^2(11) = 1325.7, p < 0.001$]. Word frequency was a significant quadratic and cubic predictor for baseline trials, and a significant cubic predictor for experimental trials. Word length was also a significant predictor for the experimental trials, following a linear trend. There was also a significant linear effect of word position for the baseline trials and experimental trials, and this effect was also significant at the quadratic level for experimental trials.

Table 5. Fixed-effects estimates of LMM for First Fixation Duration (FFD)

Fixed Effects	First fixation duration (FFD) in:							
	Baseline trials				Experimental trials			
	<i>b</i>	<i>SE</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>b</i>	<i>SE</i>	<i>t</i>	<i>p</i>
(Intercept)	227.119	4.343	52.30	< 0.0001	227.226	3.935	57.75	< 0.0001
Word frequency (linear)	89.700	161.945	0.55	0.580	-122.080	155.119	-0.79	0.431
Word frequency (quadratic)	252.036	124.466	2.03	0.043	37.102	122.222	0.30	0.762
Word frequency (cubic)	355.373	114.708	3.10	0.002	372.029	109.887	3.39	< 0.0001
Word length (linear)	-126.856	162.801	-0.78	0.436	-803.389	155.854	-5.16	< 0.0001
Word length (quadratic)	-51.912	115.358	-0.45	0.653	-33.663	111.628	-0.30	0.763
Regularity	-2.474	2.743	-0.90	0.367	-0.308	1.546	-0.20	0.842
Congruence	-	-	-	-	-0.280	1.539	-0.18	0.856
Word position (linear)	1139.530	145.601	7.83	< 0.0001	3710.001	195.593	18.97	< 0.0001
Word position (quadratic)	228.483	148.107	1.54	0.123	507.406	198.030	2.56	0.010
Regularity × Congruence	-	-	-	-	1.417	2.176	0.65	0.515
Regularity × Word position (linear)	131.706	205.095	0.64	0.521	-222.858	278.825	-0.80	0.424
Regularity × Word position (quadratic)	256.714	209.285	1.23	0.220	-27.760	283.902	-0.10	0.922
Congruence × Word position (linear)	-	-	-	-	-45.136	275.622	-0.16	0.870
Congruence × Word position (quadratic)	-	-	-	-	-268.024	279.194	-0.96	0.337
Regularity × Congruence × Word position (linear)	-	-	-	-	-163.755	392.438	-0.42	0.677
Regularity × Congruence × Word position (quadratic)	-	-	-	-	578.725	400.059	1.45	0.148
Random Effects	Variance				Variance			
	Intercept		Slope		Intercept		Slope	
Participants	635.6		-		613.3		-	
Residual			7595.1				6942.3	

Table 6 lists the LMM estimates of fixed effects for the output variable GD. Using the same control model as FFD and a likelihood-ratio approach, adding the test fixed effects and their interactions significantly increased the fit of the model across both the baseline [$\chi^2(5) = 289.64, p < 0.001$] and experimental trials [$\chi^2(11) = 2207.9, p < 0.001$]. The analyses again showed a significant effect of word frequency, this time at the quadratic level for baseline trials and at the linear and quadratic level for the experimental trials. Word length was a significant linear predictor for both series of trials. Finally, word position was a significant linear and quadratic predictor for both the baseline and experimental trials.

Table 6. Fixed-effects estimates of LMM for Gaze Duration (GD)

Fixed Effects	Gaze duration (GD) in:							
	Baseline trials				Experimental trials			
	<i>b</i>	<i>SE</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>b</i>	<i>SE</i>	<i>t</i>	<i>p</i>
(Intercept)	260.029	5.775	45.03	< 0.0001	258.689	4.850	53.34	< 0.0001
Word frequency (linear)	0.980	225.227	0.00	<i>0.997</i>	-597.021	225.935	-2.64	0.008
Word frequency (quadratic)	370.045	173.103	2.14	0.033	437.8078	178.020	2.46	0.014
Word frequency (cubic)	244.002	159.529	1.53	<i>0.126</i>	63.297	160.050	0.40	<i>0.693</i>
Word length (linear)	847.407	226.417	3.74	< 0.0001	1156.714	227.006	5.10	< 0.0001
Word length (quadratic)	59.526	160.434	0.37	<i>0.711</i>	234.271	162.589	1.44	<i>0.150</i>
Regularity	-1.959	3.852	-0.51	<i>0.611</i>	-0.127	2.251	-0.06	<i>0.955</i>
Congruence	-	-	-	-	-1.848	2.242	-0.82	<i>0.410</i>
Word position (linear)	1819.005	202.505	8.98	< 0.0001	6246.718	284.888	21.93	< 0.0001
Word position (quadratic)	1289.645	205.990	6.26	< 0.0001	3142.467	288.436	10.90	< 0.0001
Regularity × Congruence	-	-	-	-	0.413	3.169	0.13	<i>0.896</i>
Regularity × Word position (linear)	106.268	285.251	0.37	<i>0.710</i>	-352.758	406.119	-0.87	<i>0.385</i>
Regularity × Word position (quadratic)	303.573	291.078	1.04	<i>0.297</i>	529.261	413.513	1.28	<i>0.201</i>
Congruence × Word position (linear)	-	-	-	-	-363.799	401.453	-0.91	<i>0.365</i>
Congruence × Word position (quadratic)	-	-	-	-	-332.891	406.657	-0.82	<i>0.413</i>
Regularity × Congruence × Word position (linear)	-	-	-	-	-560.533	571.600	-0.98	<i>0.327</i>
Regularity × Congruence × Word position (quadratic)	-	-	-	-	113.651	582.700	0.20	<i>0.845</i>
Random Effects	Variance				Variance			
	Intercept	Slope			Intercept	Slope		
Participants	1095	-			900.4	-		
Residual	14692				14728.1			

Finally, Table 7 lists the GLMM estimates of fixed effects for the dichotomic output variable ProbF. Using the same control model as FFD and GD, combined with a likelihood-ratio approach, adding the test fixed effects and their interactions significantly increased the fit of the model across both the baseline [$\chi^2(5) = 34.267, p < 0.001$] and experimental trials [$\chi^2(11) = 2207.9, p < 0.001$]. In this case, the analyses showed significant effects of word frequency at linear, quadratic and cubic levels for both parts of the experiment. Word length, on the other hand, was a significant predictor in a linear trend for baseline trials, and in a linear and quadratic trend for experimental trials. Finally, word position was a significant linear and quadratic predictor for both the baseline and experimental trials. However, this effect was also in interaction with sentence pattern regularity for the experimental trials.

Table 7. Fixed-effects estimates of LMM for Probability of fixation (ProbF)

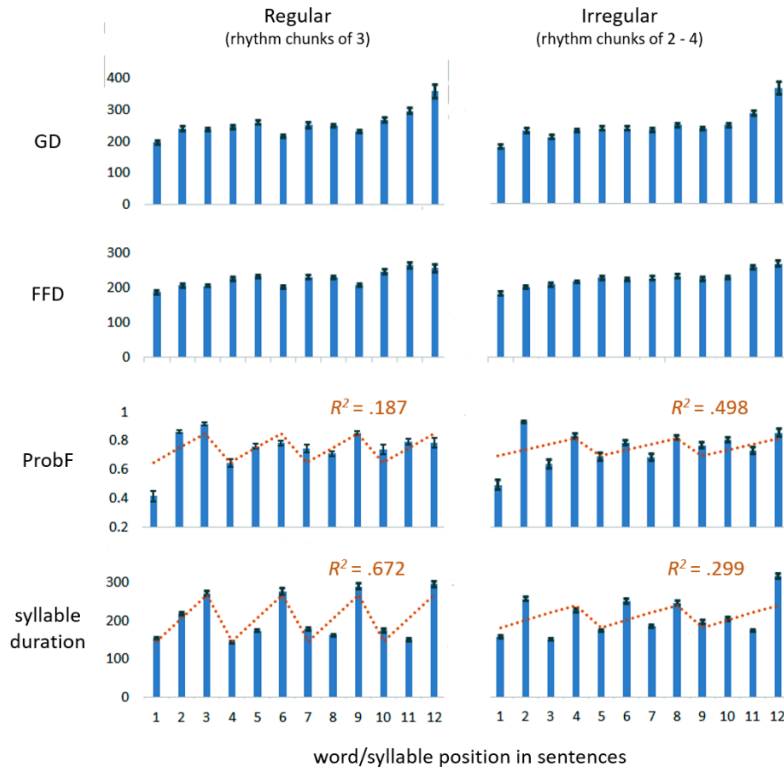
Fixed Effects	Fixation occurrence in:							
	Baseline trials				Experimental trials			
	<i>b</i>	<i>SE</i>	<i>z</i>	<i>p</i>	<i>b</i>	<i>SE</i>	<i>z</i>	<i>p</i>
(Intercept)	1.425	0.087	16.37	< 0.0001	1.370	0.081	16.90	< 0.0001
Word frequency (linear)	-8.024	3.386	-2.37	0.018	-22.017	2.984	-7.38	< 0.0001
Word frequency (quadratic)	6.492	2.569	2.53	0.012	11.557	2.410	4.80	< 0.0001
Word frequency (cubic)	-6.990	2.373	-2.95	0.003	-20.565	2.121	-9.70	< 0.0001
Word length (linear)	61.020	4.426	13.79	< 0.0001	136.857	3.934	34.79	< 0.0001
Word length (quadratic)	-7.556	3.356	-2.25	<i>0.024</i>	-26.497	2.967	-8.93	< 0.0001
Regularity	0.016	0.072	0.22	<i>0.825</i>	-0.062	0.041	-1.51	<i>0.130</i>
Congruence	-	-	-	-	0.029	0.041	0.70	<i>0.483</i>
Word position (linear)	11.576	3.694	3.13	0.002	19.923	3.870	5.15	< 0.0001
Word position (quadratic)	-12.073	3.761	-3.21	0.001	-16.895	3.780	-4.47	< 0.0001
Regularity × Congruence	-	-	-	-	-0.001	0.058	-0.02	<i>0.985</i>
Regularity × Word position (linear)	-6.275	5.098	-1.23	<i>0.218</i>	-11.007	5.553	-1.98	0.048
Regularity × Word position (quadratic)	2.124	5.184	0.41	<i>0.682</i>	-9.326	4.119	-2.26	0.024
Congruence × Word position (linear)	-	-	-	-	-1.398	3.767	-0.37	<i>0.711</i>
Congruence × Word position (quadratic)	-	-	-	-	-5.684	5.237	-1.09	<i>0.278</i>
Regularity × Congruence × Word position (linear)	-	-	-	-	1.099	5.662	0.19	<i>0.846</i>
Regularity × Congruence × Word position (quadratic)	-	-	-	-	6.762	5.966	1.13	<i>0.257</i>
Random Effects	Variance			Variance				
	Intercept	Slope		Intercept	Slope			
Participants	0.1957	-		0.2436	-			
Residual	-			-				

Overall, the above analyses reveal that the primary variable of congruence as such was not a significant factor of variation in eye movement measures. It appeared to have some minor influence on syllable durations, and only in terms of a quadratic interaction of congruency and word position. On the other hand, there were systematic effects of word position on all dependent variables. In the case of syllable duration and ProbF, this effect was also in interaction with sentence regularity. As for the control variables, there were a variety of significant effects of word frequency and word length on FFD, GD and ProbF, but likelihood-ratio tests reliably show that the addition of test fixed effects yielded significantly more explanatory fits. To visualize the data involved in these analyses, Figures 2, 3, 4 and 5 included in Appendix 2, represent the mean values of the four interest variables as a function of the word position variable, and sentence patterns are represented in seven panels to account for different irregular rhythmic groups. Three different lines also reflect baseline trials and congruence conditions, and these are horizontally divided by the rhythmic groups used in the experiment.

In interpreting the above results, one central limitation of (G)LMM analyses is that effects of regular and irregular sentence groups or chunks – which are marked by group-final word positions – may not be modeled by a categorical variable and linear functions. Moreover, effects of word position may as such reflect autocorrelation in the time series, which was not considered in the above linear mixed model. To further examine the cyclical patterns that may present in the four outcome variables, we turn to a two-step approach involving harmonic regressions.

To begin, Figure 6 represents mean values of the four outcome variables represented along the twelve word positions of the sentence. For each variable, two different panels are proposed to examine differences between regular and irregular contexts. The cyclical patterns that can be seen in syllable durations indicate that sentences were recited in chunks marked by group-final delays (similar to what can be observed in Figure 2). This occurred independently of the priming condition, as attested in the preceding mixed effects. It also appears that the only eye-motion measure which presents noticeable cycles like those of syllable durations is ProbF. However, evaluating the relationship between these variables using cross-correlation is not appropriate owing to autocorrelations. As is recognized, autocorrelation can inflate cross-correlation estimates and can create spurious correlations at different lags of time series (see Haugh (1976)). In considering these effects and since the cyclical patterns are known, a two-step approach involving harmonic regression was used (following Bloomfield (2004) and Warner (1998)). In this approach, a regression function fitting cycles is used to predict values and cross-correlations of residuals serves to evaluate whether this unexplained variance is essentially white noise (Haugh, 1976). These analyses were performed using functions of SPSS (version 25).

Figure 6. Mean values and standard deviations of GD, FFD, ProbF, and syllable durations during oral recitations for sentences with regular and irregular rhythmic chunks (n = 43).



In deriving the harmonic fits, sentences with regular rhythms or chunks of 3 monosyllabic words and irregular rhythms of 2 and 4 were modeled using equations (1) and (2), respectively. In these functions, t is the position of the word in the sequence (1, 2, 3...12), μ is the mean (estimated by the intercept), and A and B are the amplitudes of values across positions t .

$$(1) \quad X_t = \mu + A \cos(2\pi/3 \cdot t) + B \sin(2\pi/3 \cdot t) + e_t$$

$$(2) \quad X_t = \mu + A \cos(2\pi/2 \cdot t) + B \sin(2\pi/2 \cdot t) + A \cos(2\pi/4 \cdot t) + B \sin(2\pi/4 \cdot t) + e_t$$

The results of the regression fits are given in Table 8, where $\sin 3$, $\cos 3$, $\sin 2$, $\cos 2$, $\sin 4$, and $\cos 4$ designate the frequency-related factors in the above equations. The R^2 values indicate that, across regular and irregular sentence rhythms or chunks, the harmonic fits best account for the variance in syllable durations and ProbF. The harmonic fits for these variables are also plotted in the graphs of Figure 5.

Table 8. Summary statistics of harmonic regression on eye-motion variables and syllable durations.

Sentence rhythm	X	b	sin3	cos3	sin2	cos2	sin4	cos4	F ⁽¹⁾	R ²
Regular (cycles 3)	Syll. dur.	207.635	-61.435***	-44.954***	--	--	--	--	125.057***	.672
	ProbF	.752	-.030***	-.115***	--	--	--	--	59.116***	.187
	FFD	237.063	9.017**	-2.233	--	--	--	--	5.350**	.020
	GD	254.416	.569	-13.983**	--	--	--	--	5.268**	.021
Irregular (cycles 2 & 4)	Syll. dur.	210.984	--	--	-484.384	-43.038***	-13.470***	3.649	126.904***	.498
	ProbF	.760	--	--	-9.259***	-.166***	-.012	-.003	54.493***	.299
	FFD	224.973	--	--	-208.825	-5.176	-11.104***	-9.344	9.290***	.068
	GD	255.838	--	--	385.888	-11.463*	-20.729***	-13.199**	16.678***	.117

⁽¹⁾ df for models using sin3, cos3: 2,513; for models using sin2, cos2, sin4, cos4: 4,511

*** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$

Cross-correlations between predicted syllable durations and ProbF for sentences with regular chunks of 3, showed a maximal R^2 of .593 at a zero lag with secondary peaks appearing on lags of 3 and 6, which conforms to the rhythms of sentences. Cross-correlation of residuals did not exceed .004, indicating that the residuals were essentially white noise. For sentences with irregular chunks of 4 and 2, a maximal R^2 of .738 was obtained at a zero lag. However, cross-correlating the residuals gave a maximal R^2 of .044 at lag 2, and a secondary R^2 of .030 at a negative lag of 3, which exceeded confidence intervals for white noise. This suggests that the cross-correlation estimates for sentences with irregular chunks are inflated and that residuals in these time series could explain a portion of the overall variance (about .074, leaving an R^2 of .683). On the other hand, it is important to note in Figure 5 that the cyclical fits for predicted variables of ProbF and syllable durations show a narrow zero-lag relation across both regular and irregular rhythm chunks. Thus, measures such as ProbF appear to coincide with chunking as marked in syllable durations.

Discussion

Regarding entrainment effects on rhythmic chunking in reading, the results show no effect of different types of primes on global reading measures of speech onset and reading time. Word-level measures of syllable length were not influenced either, as there were no obvious effects of congruency on patterns of oral recitation. Hence, as it appears, auditory primes do not “entrain” rhythms in reading. In fact, it was rather observed that rhythmic chunking in reading was self-generated. This finding bears some relevance with results showing that read speech presents more regular rhythmicity than spontaneous speech (Guaïtella, 1991, 1999). In other words, reading aloud

implies a constrained text that generates particularly predictable rhythmic groupings that may not emerge as reliably in a common communicational context, where speech is prone to many pauses and hesitations. In the present study, readers were persistent in following the groupings suggested by the prosodic-syntactic structure of sentences.

Regarding eye tracking-related variables, there were no effects of priming congruency on eye movements (GD, FFD, ProbF). There were, however, effects of word position for the three variables, and this effect was in a significant interaction with sentence regularity for ProbF. That such an interaction between word position and sentence regularity predicted ProbF was confirmed by cyclic analyses of harmonic regressions. In interpreting this result, it was found that there was a zero lag between probabilistic counts of fixations and syllable durations in text recitation. Here, it is important to keep in mind the difference between counts of fixations and measures of fixation durations represented by FFD and GD. In reading, a forward scanning of a block of text occurs some 500 ms before initiating a recitation, if one refers to recent statistics with normal adult readers (Inhoff et al., 2011). However, the process of text-to-speech conversion is complex: between the fixation of a word and its recitation, eye movements may proceed with the eyes skipping or refixating items on a line. The above results show that, across thousands of sentences, durational measures of FFD and GD bear no systematic patterns in eye movements, or else that existing patterns may be blurred due to this inherent complexity. In contrast, probabilistic counts of fixations, which present mean values that are not affected by the non-linearity of reading, present cyclical fluctuations that coincide with chunks in recitations. This sheds some light on the process of text-to-speech conversion. As noted, it is a commonplace observation that chunks arise spontaneously in reciting lists of words. This implies that, in reading out sequences of verbal items, chunking applies at some point in the conversion of visual signs to speech. In view of the above observations, probabilistic eye motions may represent a key variable in understanding the link between visual sampling and speech chunking, as seen in the zero lag between chunk patterns in ProbF and syllable durations.

There are, however, several restrictions on the above results and their interpretation. Perhaps the most serious restriction is that probabilistic measures of fixations do not serve to infer causal relations in a text-to-speech conversion process. The above measure of ProbF reveals that chunking is inherent to reading, but this measure does not serve to circumscribe the timeline of this process

within the steps involved in converting text to speech. If this conversion occurs within an eye-voice span of 500 ms, then there is the need for time-based measures that are more suited to timing the chunking process than fixation counts. Secondly, it is also worth noting that the above GLMM analyses revealed effects of word frequency for ProbF. There is thus a relationship between word frequency and probabilistic fixations, and this can imply intervening effects on what is currently interpreted as a form of perceptual chunking. In the context of sentences, it appears that lexemes or “content words”, as opposed to more frequent morphemes or “function words”, tend to occur in phrase-final position even though morphemes like pronouns and prepositions can also occur in these positions. Yet chunking is always marked by inter-item delays at group-final points, regardless of whether groups end with lexemes or morphemes. In other words, it is difficult to separate within the above set of observations effects of word frequency from those that arise from a chunking process. However, it should be clear that word frequency does not cause inter-item delays at group-final positions on the syllable duration variable.

On sensorimotor grounding during reading

Some may observe that the current results bear on recordings of oral reading, as opposed to more frequent silent reading behaviors. Indeed, there are slight differences as reported in the literature, such that fixations in oral reading are generally 50 ms longer than fixations in silent reading (Rayner, 1998). However, as noted by Laubrock and Kliegl (2015), reading may be more grounded in orality than it appears. In fact, up to the 8th century, reading was generally practiced out loud and viewed as an oratory skill (as documented in historical discussions by Manguel (1998)). It is also acknowledged that covert and overt speech in reading cannot be easily dissociated. Physiological evidence of a link was provided in early reports, which established that silent reading entails activity in muscles of phonation and articulation, as well as changes in respiration (Edfeldt, 1960; McGuigan, Keller, & Stanton, 1964). More recently, research involving fMRI has revealed that the impression of “inner speech” in reading associates with activity in voice-related areas of the brain (Kurby, Magliano, & Rapp, 2009; Perrone-Bertolotti et al., 2012; Shankweiler et al., 2008; Yao, Belin, & Scheepers, 2011). As for patterns that can relate to sensory chunking, research using EEG and iEEG has shown that responses in silent reading are evoked by commas or phrase boundaries, as if sequences of text are covertly spoken (Roll, Lindgren, Alter, & Horne, 2012; Steinhauer, 2003; Steinhauer & Friederici, 2001). Moreover, similar syllable-size amplitude modulations in neural response emerge for both silent and overt reading (Magrassi, Aromataris,

Cabrini, Annovazzi-Lodi, & Moro, 2015). There is, then, substantial evidence that silent reading can reflect speech in reading aloud. But as discussed earlier, there remains a critical problem in that speech in reading is not concurrent with the scanning of text and evaluating the relations between these processes requires a consideration that speech is sequential whereas eye motions are not strictly linear or sequential.

In accordance with the sensorimotor properties of silent reading, theories of “implicit prosody” have also suggested that reading mechanisms may imply an influence of prosody, even when sequences are decoded silently (Fodor, 1998, 2002). For instance, a body of work in eye-tracking research has shown that eye movements in reading are guided by implicit knowledge about lexical stress. In Italian, words are fixated for a shorter time if they are preceded by another stress-congruent word (Colombo & Zevin, 2009), and target words of English containing two stressed syllables are fixated longer and more often than equivalent target words containing only one stressed syllable (Ashby & Clifton Jr, 2005). Kentner (2012) also demonstrated that speech rhythm constraints, such as the avoidance of “stress clash” in German, can be indirectly observed in eye-tracking data during silent reading, again suggesting that readers perceive some form of prosodic information when decoding a text. Taken together, this work suggests that eye-motions can be influenced not only by factors of visual recognition (word frequency, length of words in characters, etc.) and semantic-syntactical prediction, but also by knowledge of prosodic structures. On the other hand, it needs to be asked whether these factors should be associated to some form of neural entrainment in endogenous low-frequency oscillations. The experimental demonstrations of implicit prosody tend to revolve around notions of lexical stress. However, these are not specific to any language. For example, the present findings involve speakers of French, a language that does not have lexical stress. In the present study, rhythm chunks are rather defined in terms of domain-general marks of inter-item delays which appear across behaviors and species in contexts of processing sensorimotor sequences. Studies on implicit prosody may benefit from using more domain-general chunking behavior in describing the influence of prosody on reading. The fact that lexical stress is language specific presents a problem on this count: there is a need to weigh in various measures which could present a fundamental link with respect to speech rhythm in reading.

Conclusion

To summarize, it may be useful to recall the general objective of this study. We intended to test for the presence of rhythmic patterns or cyclical behavior during reading processes that may account for developmental links between rhythmic and decoding skills. Hypotheses were twofold: 1) empirically verifying that rhythmic primes would not influence recitation in reading aloud; 2) Examining the presence of rhythmic behavior in the visual sampling mechanisms of reading. On the first aspect, it appears that readers self-generate rhythmic chunks in text that are independent from an acoustic priming. This chunking of information, strictly followed by readers as represented in Figures 2 and 6, illustrates how oral reading is an inherently rhythmic behavior. On the second part of the hypothesis, it was observed that fixation probabilities varied in a cyclical manner along the word position variable, similar to the way participants chunked information orally. This result provides a novel observation of cyclic patterns during reading behavior, and probabilistic counts of fixations may provide a link between visual sampling of text and rhythmic speech behavior. However, these specific results are prone to limitations due to the non-sequentiality of oculomotor reading behavior and mediatory effects of word frequency variables. Future studies may benefit from using a quantification of probabilistic counts in reading that also incorporates temporal values.

References

- American Psychiatric Association. (2013). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders (DSM-5®)* (5e ed.). Arlington, VA: American Psychiatric Publishing.
- Ashby, J., & Clifton Jr, C. (2005). The prosodic property of lexical stress affects eye movements during silent reading. *Cognition*, *96*(3), B89-B100. doi:10.1016/j.cognition.2004.12.006
- Atterbury, B. W. (1983). A comparison of rhythm pattern perception and performance in normal and learning-disabled readers, age seven and eight. *Journal of Research in Music Education*, *31*(4), 259-270. doi:10.2307/3344629
- Atterbury, B. W. (1985). Musical differences in learning-disabled and normal-achieving readers, aged seven, eight and nine. *Psychology of Music*, *13*(2), 114-123. doi:10.1177/0305735685132005
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2014). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *arXiv preprint arXiv:1406.5823*.
- Bloomfield, P. (2004). *Fourier analysis of time series: an introduction*. New York: John Wiley & Sons.
- Boersma, P. (2001). Praat, a system for doing phonetics by computer. *Glott International*, *5*, 341-345.
- Boucher, V. J. (2006). On the function of stress rhythms in speech: evidence of a link with grouping effects on serial memory. *Language and speech*, *49*(4), 495-519. doi:10.1177/00238309060490040301
- Boucher, V. J., Gilbert, A. C., & Jemel, B. (2019). The Role of Low-frequency Neural Oscillations in Speech Processing: Revisiting Delta Entrainment. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *31*(8), 1-11. doi:10.1162/jocn_a_01410
- Colombo, L., & Zevin, J. (2009). Stress Priming in Reading and the Selective Modulation of Lexical and Sub-Lexical Pathways. *PLoS One*, *4*(9), e7219. doi:10.1371/journal.pone.0007219
- Cowan, N. (2001). Metatheory of storage capacity limits. *Behavioral and Brain Sciences*, *24*(1), 154-176. doi:10.1017/S0140525X0161392X
- David, D., Wade-Woolley, L., Kirby, J. R., & Smithrim, K. (2007). Rhythm and reading development in school-age children: a longitudinal study. *Journal of Research in Reading*, *30*(2), 169-183. doi:10.1111/j.1467-9817.2006.00323.x
- De Luca, M., Pontillo, M., Primativo, S., Spinelli, D., & Zoccolotti, P. (2013). The eye-voice lead during oral reading in developmental dyslexia. *Frontiers in human neuroscience*, *7*, 696. doi:10.3389/fnhum.2013.00696
- Dellatolas, G., Watier, L., Le Normand, M.-T., Lubart, T., & Chevrie-Muller, C. (2009). Rhythm reproduction in kindergarten, reading performance at second grade, and developmental dyslexia theories. *Archives of Clinical Neuropsychology*, *24*(6), 555-563. doi:10.1093/arclin/acp044
- Douglas, S., & Willatts, P. (1994). The relationship between musical ability and literacy skills. *Journal of Research in Reading*, *17*(2), 99-107. doi:10.1111/j.1467-9817.1994.tb00057.x
- Edfeldt, A. W. (1960). *Silent speech and silent reading*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Fant, G., Kruckenberg, A., & Nord, L. (1991). Durational correlates of stress in Swedish, French and English. *Journal of Phonetics*, *19*(3-4), 351-365. doi:10.1016/S0095-4470(19)30327-4

- Fodor, J. D. (1998). Learning To Parse? *Journal of Psycholinguistic Research*, 27(2), 285-319. doi:10.1023/a:1023258301588
- Fodor, J. D. (2002). *Psycholinguistics cannot escape prosody*. Paper presented at the Speech Prosody 2002, International Conference, Aix-en-Provence, France.
- Gagl, B., Golch, J., Hawelka, S., Sassenhagen, J., Gregorova, K., Poeppel, D., & Fiebach, C. J. (2019). Reading at the speed of speech: Alignment of eye-movement sampling in reading with the speech production rate. Manuscript submitted for publication.
- Gilbert, A. C., Boucher, V. J., & Jemel, B. (2014). Perceptual chunking and its effect on memory in speech processing: ERP and behavioral evidence. *Frontiers in psychology*, 5, 220. doi:10.3389/fpsyg.2014.00220
- Gilbert, A. C., Boucher, V. J., & Jemel, B. (2015). The perceptual chunking of speech: a demonstration using ERPs. *Brain Research*, 1603, 101-113. doi:10.1016/j.brainres.2015.01.032
- Gimenes, M., & New, B. (2016). Worldlex: Twitter and blog word frequencies for 66 languages. *Behavior Research Methods*, 48(3), 963-972. doi:10.3758/s13428-015-0621-0
- Giraud, A.-L., & Poeppel, D. (2012). Cortical oscillations and speech processing: emerging computational principles and operations. *Nature neuroscience*, 15(4), 511-517. doi:10.1038/nn.3063
- Gola-Asmussen, C., Lequette, C., Pouget, G., Rouyer, C., & Zorman, M. (2011). ECLA-16+: Évaluation des compétences de lecture chez l'adulte de plus de 16 ans. *Grenoble, France : Université de Provence Aix-Marseille I-Cognisciences LSE Université Pierre Mendès*.
- Goswami, U. (2011). A temporal sampling framework for developmental dyslexia. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(1), 3-10. doi:10.1016/j.tics.2010.10.001
- Goswami, U. (2017). A Neural Basis for Phonological Awareness? An Oscillatory Temporal-Sampling Perspective. *Current Directions in Psychological Science*, 27(1), 0963721417727520. doi:10.1177/0963721417727520
- Gould, L., McKibben, T., Ekstrand, C., Lorentz, E., & Borowsky, R. (2016). The beat goes on: the effect of rhythm on reading aloud. *Language, cognition and neuroscience*, 31(2), 236-250. doi:10.1080/23273798.2015.1089360
- Gould, L., Mickleborough, M. J. S., Ekstrand, C., Lorentz, E., & Borowsky, R. (2017). Examining the neuroanatomical and the behavioural basis of the effect of basic rhythm on reading aloud. *Language, cognition and neuroscience*, 32(6), 724-742. doi:10.1080/23273798.2016.1271135
- Gould, L., Mickleborough, M. J. S., Lorentz, E., Ekstrand, C., & Borowsky, R. (2018). A behavioral and fMRI examination of the effect of rhythm on reading noun-verb homographs aloud. *Language, cognition and neuroscience*, 33(7), 829-849. doi:10.1080/23273798.2018.1442012
- Graybiel, A. M., & Grafton, S. T. (2015). The striatum: where skills and habits meet. *Cold Spring Harbor perspectives in biology*, 7(8), a021691. doi:10.1101/cshperspect.a021691
- Guaïtella, I. (1991). *Rythme et parole: comparaison critique du rythme de la lecture oralisée et de la parole spontanée*. (Doctorat). Aix-Marseille 1, Aix-Marseille.
- Guaïtella, I. (1999). Rhythm in speech: What rhythmic organizations reveal about cognitive processes in spontaneous speech production versus reading aloud. *Journal of Pragmatics*, 31(4), 509-523. doi:10.1016/S0378-2166(98)00079-4
- Haugh, L. D. (1976). Checking the independence of two covariance-stationary time series: a univariate residual cross-correlation approach. *Journal of the American Statistical Association*, 71(354), 378-385.

- Heister, J., Würzner, K.-M., & Kliegl, R. (2012). Analysing large datasets of eye movements during reading. In *Visual word recognition* (pp. 102-130). London: Psychology Press.
- Holliman, A., Wood, C., & Sheehy, K. (2008). Sensitivity to speech rhythm explains individual differences in reading ability independently of phonological awareness. *British Journal of Developmental Psychology, 26*(3), 357-367. doi:10.1348/026151007X241623
- Holliman, A., Wood, C., & Sheehy, K. (2010a). The contribution of sensitivity to speech rhythm and non-speech rhythm to early reading development. *Educational Psychology, 30*(3), 247-267. doi:10.1080/01443410903560922
- Holliman, A., Wood, C., & Sheehy, K. (2010b). Does speech rhythm sensitivity predict children's reading ability 1 year later? *Journal of educational psychology, 102*(2), 356-366. doi:10.1037/a0018049
- Howard, M. F., & Poeppel, D. (2010). Discrimination of speech stimuli based on neuronal response phase patterns depends on acoustics but not comprehension. *Journal of Neurophysiology, 104*(5), 2500-2511. doi:10.1152/jn.00251.2010
- Inhoff, A. W., Solomon, M., Radach, R., & Seymour, B. A. (2011). Temporal dynamics of the eye-voice span and eye movement control during oral reading. *Journal of Cognitive Psychology, 23*(5), 543-558. doi:10.1080/20445911.2011.546782
- Kelso, J. (1997). Relative timing in brain and behavior: Some observations about the generalized motor program and self-organized coordination dynamics. *Human Movement Science, 16*(4), 453-460. doi:10.1016/S0167-9457(96)00044-9
- Kentner, G. (2012). Linguistic rhythm guides parsing decisions in written sentence comprehension. *Cognition, 123*(1), 1-20. doi:10.1016/j.cognition.2011.11.012
- Kurby, C. A., Magliano, J. P., & Rapp, D. N. (2009). Those voices in your head: Activation of auditory images during reading. *Cognition, 112*(3), 457-461. doi:10.1016/j.cognition.2009.05.007
- Kuznetsova, A., Brockhoff, P. B., & Christensen, R. H. B. (2017). lmerTest package: tests in linear mixed effects models. *Journal of Statistical Software, 82*(13). doi:10.18637/jss.v082.i13
- Lakatos, P., Karmos, G., Mehta, A. D., Ulbert, I., & Schroeder, C. E. (2008). Entrainment of neuronal oscillations as a mechanism of attentional selection. *Science, 320*(5872), 110-113. doi:10.1126/science.1154735
- Laubrock, J., & Kliegl, R. (2015). The eye-voice span during reading aloud. *Frontiers in psychology, 6*, 1432. doi:10.3389/fpsyg.2015.01432
- Magrassi, L., Aromataris, G., Cabrini, A., Annovazzi-Lodi, V., & Moro, A. (2015). Sound representation in higher language areas during language generation. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 112*(6), 1868-1873. doi:10.1073/pnas.1418162112
- Manguel, A. (1998). *Une histoire de la lecture*. Paris: Éditions Actes Sud.
- Martin, P. (2019). Génération automatique de la structure prosodique en Français. *Journal of Speech Sciences, 7*(2), 79-91.
- McGivern, R. F., Berka, C., Languis, M. L., & Chapman, S. (1991). Detection of deficits in temporal pattern discrimination using the seashore rhythm test in young children with reading impairments. *Journal of Learning Disabilities, 24*(1), 58-62. doi:10.1177/002221949102400110
- McGuigan, F. J., Keller, B., & Stanton, E. (1964). Covert language responses during silent reading. *Journal of educational psychology, 55*(6), 339-343. doi:10.1037/h0043772
- Meyler, A., & Breznitz, Z. (2005). Visual, auditory and cross-modal processing of linguistic and nonlinguistic temporal patterns among adult dyslexic readers. *Dyslexia, 11*(2), 93-115. doi:10.1002/dys.294

- Miller, G. (1962). Decision units in the perception of speech. *IRE Transactions on Information Theory*, 8(2), 81-83. doi:10.1109/TIT.1962.1057697
- Molinaro, N., Lizarazu, M., Lallier, M., Bourguignon, M., & Carreiras, M. (2016). Out-of-synchrony speech entrainment in developmental dyslexia. *Human Brain Mapping*, 37(8), 2767-2783. doi:10.1002/hbm.23206
- Perrone-Bertolotti, M., Kujala, J., Vidal, J. R., Hamame, C. M., Ossandon, T., Bertrand, O., . . . Lachaux, J.-P. (2012). How Silent Is Silent Reading? Intracerebral Evidence for Top-Down Activation of Temporal Voice Areas during Reading. *The Journal of Neuroscience*, 32(49), 17554-17562. doi:10.1523/jneurosci.2982-12.2012
- Power, A., Mead, N., Barnes, L., & Goswami, U. (2013). Neural entrainment to rhythmic speech in children with developmental dyslexia. *Frontiers in human neuroscience*, 7(777). doi:10.3389/fnhum.2013.00777
- Rautenberg, I. (2015). The effects of musical training on the decoding skills of German-speaking primary school children. *Journal of Research in Reading*, 38(1), 1-17. doi:10.1111/jrir.12010
- Rayner, K. (1998). Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. *Psychological Bulletin*, 124(3), 372-422. doi:10.1037/0033-2909.124.3.372
- Rayner, K., Ashby, J., Pollatsek, A., & Reichle, E. D. (2004). The effects of frequency and predictability on eye fixations in reading: Implications for the EZ Reader model. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 30(4), 720. doi:10.1037/0096-1523.30.4.720
- Rayner, K., Schotter, E. R., & Drieghe, D. (2014). Lack of semantic parafoveal preview benefit in reading revisited. *Psychonomic Bulletin & Review*, 21(4), 1067-1072. doi:10.3758/s13423-014-0582-9
- Roll, M., Lindgren, M., Alter, K., & Horne, M. (2012). Time-driven effects on parsing during reading. *Brain and Language*, 121(3), 267-272. doi:10.1016/j.bandl.2012.03.002
- Shankweiler, D., Mencl, W. E., Braze, D., Tabor, W., Pugh, K. R., & Fulbright, R. K. (2008). Reading differences and brain: Cortical integration of speech and print in sentence processing varies with reader skill. *Developmental neuropsychology*, 33(6), 745-775. doi:10.1080/87565640802418688
- Soltesz, F., Szucs, D., Leong, V., White, S., & Goswami, U. (2013). Differential entrainment of neuroelectric delta oscillations in developmental dyslexia. *PLoS One*, 8(10), e76608. doi:10.1371/journal.pone.0076608
- Steinhauer, K. (2003). Electrophysiological correlates of prosody and punctuation. *Brain and Language*, 86(1), 142-164. doi:10.1016/S0093-934X(02)00542-4
- Steinhauer, K., & Friederici, A. D. (2001). Prosodic Boundaries, Comma Rules, and Brain Responses: The Closure Positive Shift in ERPs as a Universal Marker for Prosodic Phrasing in Listeners and Readers. *Journal of Psycholinguistic Research*, 30(3), 267-295. doi:10.1023/a:1010443001646
- Terrace, H. (2001). Chunking and serially organized behavior in pigeons, monkeys and humans. In R. G. Cook (Ed.), *Avian visual cognition*.
- Thomson, J. M., Fryer, B., Maltby, J., & Goswami, U. (2006). Auditory and motor rhythm awareness in adults with dyslexia. *Journal of Research in Reading*, 29(3), 334-348. doi:10.1111/j.1467-9817.2006.00312.x
- Thomson, J. M., & Goswami, U. (2008). Rhythmic processing in children with developmental dyslexia: auditory and motor rhythms link to reading and spelling. *Journal of Physiology-Paris*, 102(1-3), 120-129. doi:10.1016/j.jphysparis.2008.03.007

- Tierney, A., & Kraus, N. (2013). The ability to tap to a beat relates to cognitive, linguistic, and perceptual skills. *Brain and Language*, *124*(3), 225-231. doi:10.1016/j.bandl.2012.12.014
- Tierney, A., & Kraus, N. (2014). Auditory-motor entrainment and phonological skills: precise auditory timing hypothesis (PATH). *Frontiers in human neuroscience*, *8*(949). doi:10.3389/fnhum.2014.00949
- Warner, R. M. (1998). *Spectral analysis of time-series data*. New York: Guilford Press.
- Watkins, K. E., Strafella, A. P., & Paus, T. (2003). Seeing and hearing speech excites the motor system involved in speech production. *Neuropsychologia*, *41*(8), 989-994. doi:10.1016/S0028-3932(02)00316-0
- Whalley, K., & Hansen, J. (2006). The role of prosodic sensitivity in children's reading development. *Journal of Research in Reading*, *29*(3), 288-303. doi:10.1111/j.1467-9817.2006.00309.x
- Wilkes, A. L., Lloyd, P., & Simpson, I. (1972). Pause measures during reading and recall in serial list learning. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *24*(1), 48-54. doi:10.1080/14640747208400267
- Wilson, S. M., Saygin, A. P., Sereno, M. I., & Iacoboni, M. (2004). Listening to speech activates motor areas involved in speech production. *Nature neuroscience*, *7*(7), 701. doi:10.1038/nn1263
- Wolff, P. H. (2002). Timing precision and rhythm in developmental dyslexia. *Reading and Writing: an Interdisciplinary Journal*, *15*(1-2), 179-206. doi:10.1023/A:1013880723925
- Wood, C. (2006). Metrical stress sensitivity in young children and its relationship to phonological awareness and reading. *Journal of Research in Reading*, *29*(3), 270-287. doi:10.1111/j.1467-9817.2006.00308.x
- Yao, B., Belin, P., & Scheepers, C. (2011). Silent reading of direct versus indirect speech activates voice-selective areas in the auditory cortex. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *23*(10), 3146-3152. doi:10.1162/jocn_a_00022

Appendix 1: Lists of priming and reading stimuli

Table 1. List of heard utterance priming stimuli

Sentence regularity (Chunking pattern)	Sentence
Regular (3333)	<i>Le coq chante / sur le toit / le matin / de bonne heure.</i>
Regular (3333)	<i>Il tient Luce / dans ses bras / tout le temps / lors du bal.</i>
Regular (3333)	<i>Il les compte / un à un / dans sa main / en silence.</i>
Regular (3333)	<i>Il me paye / à temps doub(le) / comme les autres / sous la table.</i>
Regular (3333)	<i>Marc les jette / dans un bac / tout au fond / près du mur.</i>
Regular (3333)	<i>Il s'en va / tout à l'heure / à Saint Paul / en avion.</i>
Regular (3333)	<i>Pierre l'a tué / de sang-froid / dans la nuit / sur la route.</i>
Regular (3333)	<i>La grippe court / au mois d'août / chez les vieux / dans les villes.</i>
Regular (3333)	<i>On (ne) fume plus / à la pause / dans les salles / près des portes.</i>
Regular (3333)	<i>Jules en boit / tous les soirs / à la tab(le) / dans une tasse.</i>
Regular (3333)	<i>Ces pneus collent / sur la piste / par temps chaud / comme d'la gomme.</i>
Regular (3333)	<i>Les feuilles poussent / sur ces troncs / même au sol / sous la neige.</i>
Irregular (4224)	<i>Louis en a pris / d'une main / pour elle / sans rien lui dire.</i>
Irregular (4224)	<i>On les a cuits / au four / en cube / sur la tôle chaude.</i>
Irregular (2442)	<i>Ils roulent / cent milles à l'heure / sur la grande piste / vers eux.</i>
Irregular (2442)	<i>On vote / pour un des maires / dans cette salle vide / sous peu.</i>
Irregular (2424)	<i>Ça pousse / sur ces longues tiges / en grappe / même sous la glace.</i>
Irregular (2424)	<i>Elle crie / de toutes ses forces / vers nous / pour qu'on la suive.</i>
Irregular (4242)	<i>Ces fleurs se vendent / en vrac / en boîte de douze / en juin.</i>
Irregular (4242)	<i>Elle les a mis / hier soir / dans son sac noir / pour moi.</i>
Irregular (2244)	<i>George sort / en sueur / de ce dur match / les poings en sang.</i>
Irregular (2244)	<i>Maude dort / toute seule / comme une grande fille / dans son lit simple.</i>
Irregular (4422)	<i>Le garde l'a pris / par les deux bras / tout seul / sans arme.</i>
Irregular (4422)	<i>Josh en a bu / lors de ma fête / deux fois / chez moi.</i>

Note: Each boundary between heard chunks is represented by a forward slash.

Table 2. List of read sentences

Sentence regularity (Chunking pattern)	Sentence
Regular (3333)	<i>Ce joueur court / vingt-deux milles / sur la plaine / par temps doux.</i>
Regular (3333)	<i>Jacques le pousse / peu à peu / dans le dos / vers la porte.</i>
Regular (3333)	<i>Le chef parle / pour des heures / à ses troupes / sur le front.</i>
Regular (3333)	<i>Les prix baissent / à la bourse / de trois points / en deux temps.</i>
Regular (3333)	<i>Le feu prend / pour un rien / dans la brousse / par temps sec.</i>
Regular (3333)	<i>Elle le signe / au plus vite / sur la ligne / tout en bas.</i>
Regular (3333)	<i>Ma tante part / coûte que coûte / sans sa fille / dans deux heures.</i>
Regular (3333)	<i>Le garde sort / à la course / par cette porte / vers la gare.</i>
Regular (3333)	<i>On se voit / le trois mars / chez ma tante / pour une heure.</i>
Regular (3333)	<i>Le pôle bouge / de deux mètres / vers le sud / tous les ans.</i>
Regular (3333)	<i>Les gens meurent / de la peste / en bas âge / sur cette île.</i>
Regular (3333)	<i>Luce lui parle / à voix douce / sans son voile / toutes les nuits.</i>
Regular (3333)	<i>Tu en mets / au compte-goutte / dans son verre / pour sa toux.</i>
Regular (3333)	<i>Luc en vend / à bas prix / aux plus jeunes / dans le parc.</i>
Regular (3333)	<i>On le trouve / sans sa canne / sur cette rue / près du bar.</i>
Regular (3333)	<i>La mer monte / par grandes vagues / sur les côtes / ces temps-ci.</i>
Regular (3333)	<i>La corde pend / près du sol / juste à gauche / dans la cage.</i>
Regular (3333)	<i>Le loup chasse / tous les jours / près des fermes / dans le sud.</i>
Regular (3333)	<i>Il la chante / à voix basse / dans la pièce / juste pour vous.</i>
Regular (3333)	<i>Ève se couche / sans un mot / dans sa loge / sur le sol.</i>
Regular (3333)	<i>On se lève / dans la salle / pour le juge / sans rien dire.</i>
Regular (3333)	<i>Mon frère chante / à tue tête / sous la douche / à chaque jour.</i>
Regular (3333)	<i>Il se cache / sous les dalles / dans les coins / lors des pluies.</i>
Regular (3333)	<i>Je le vois / une seule fois / dans le train / sans sa femme.</i>
Regular (3333)	<i>Le vent gronde / comme un loup / tout au loin / sur la côte.</i>
Regular (3333)	<i>La glace gèle / près du fleuve / dans la grange / chez mon oncle.</i>
Regular (3333)	<i>La chaîne cède / à trois pieds / sous le poids / comme de rien.</i>
Regular (3333)	<i>Les plantes meurent / une à une / en trois jours / dans nos serres.</i>
Regular (3333)	<i>Je me lève / dans mon lit / sous mes draps / tout en sueur.</i>
Regular (3333)	<i>Le gaz coule / de ce trou / par grosses gouttes / dans la mare.</i>

Regular (3333)	<i>Il nous bloque / à la porte / face au bar / dans un coin.</i>
Regular (3333)	<i>Kim le tasse / de sa main / vers la bande / juste pour rire.</i>
Regular (3333)	<i>Elle le fixe / sur sa blouse / près du col / comme une broche.</i>
Regular (3333)	<i>Ma fille part / pour les fêtes / sans un sou / chez sa tante.</i>
Regular (3333)	<i>La viande cuit / à feu doux / pour deux heures / dans une poêle.</i>
Regular (3333)	<i>Je le lis / à voix haute / pour les hommes / dans cette grotte.</i>
Regular (3333)	<i>Les hommes boivent / dans un crâne / sous la lune / près des pins.</i>
Regular (3333)	<i>La bête hurle / de toute force / dans la crypte / sous les cloches.</i>
Regular (3333)	<i>Le vieux dort / dans un lit / près des vitres / sans son drap.</i>
Regular (3333)	<i>Le crime paie / dans cette ville / juste au sud / près du port.</i>
Regular (3333)	<i>Le chien dort / dans sa niche / à chaque soir / vers huit heures.</i>
Regular (3333)	<i>Le banc craque / juste au centre / en ligne droite / sous son poids.</i>
Irregular (4224)	<i>Cet homme lui parle / au banc / sans gêne / lors de sa pause.</i>
Irregular (4224)	<i>Le chien nous guide / en douce / vers lui / au bout du champ.</i>
Irregular (4224)	<i>Les gens le voient / au parc / sans chien / sous le chêne vert.</i>
Irregular (4224)	<i>Sa mère le gronde / en classe / à tort / pour ses fausses notes.</i>
Irregular (4224)	<i>Cette jeune fille prie / en pleurs / à gauche / près de son père.</i>
Irregular (4224)	<i>Tous les hommes rôdent / en groupe / aux portes / lors de la grève.</i>
Irregular (4224)	<i>Le chef les cuit / chaque jour / pour nous / dans sa grande poêle.</i>
Irregular (2442)	<i>Paul chante / de sa voix grave / face à cette foule / sans texte.</i>
Irregular (2442)	<i>Il vient / dans son gros char / pour faire le plein / chaque mois.</i>
Irregular (2442)	<i>Il pige / deux fois sur trois / à la même table / sans cesse.</i>
Irregular (2442)	<i>Elle part / au cours du mois / sans ses deux chats / en Chine.</i>
Irregular (2442)	<i>Il passe / hors de ma vue / dans les longues plantes / au fond.</i>
Irregular (2442)	<i>On loge / au bord du fleuve / dans une grande pièce / à deux.</i>
Irregular (2442)	<i>Il paye / tous les deux ans / de son compte chèques / sans faute.</i>
Irregular (2424)	<i>On dîne / à tous les mois / sans frais / dans un des trains.</i>
Irregular (2424)	<i>Il marche / quand il le veut / en bottes / sur la grande route.</i>
Irregular (2424)	<i>Il quitte / pour une pause brève / sans elle / le long des berges.</i>
Irregular (2424)	<i>Il fête / sur la grande place / en France / suite à la guerre.</i>
Irregular (2424)	<i>Elle vient / à la fin mai / en train / lors des grands jeux.</i>
Irregular (2424)	<i>Ça gicle / de toutes les bornes / par jets / quand le feu prend.</i>
Irregular (2424)	<i>Jules marque / de son tir franc / au loin / à la ligne bleue.</i>
Irregular (4242)	<i>Yves leur a dit / tout bas / une ou deux fois / en août.</i>

Irregular (4242)	<i>Ses filles le croisent / des fois / au fond du bar / les soirs.</i>
Irregular (4242)	<i>Mon chat se couche / le jour / sur la chaise longue / à droite.</i>
Irregular (4242)	<i>Les gens se couchent / en mai / sur les vieux quais / au port.</i>
Irregular (4242)	<i>Ma mère a bu / très vite / dans la tasse bleue / sans paille.</i>
Irregular (4242)	<i>Ce sport se joue / à Nice / à tous les jours / pieds nus.</i>
Irregular (4242)	<i>Les gardes font feu / de loin / face à la foule / à Prague.</i>
Irregular (2244)	<i>Ils glissent / en ski / sur le Mont Blanc / sans se faire mal.</i>
Irregular (2244)	<i>Il vote / ce soir / dans la grande salle / sans trop y croire.</i>
Irregular (2244)	<i>Il rit / très fort / de ces bottes laides / comme un vrai sot.</i>
Irregular (2244)	<i>Elles marchent / toutes deux / dans le grand parc / au bord du lac.</i>
Irregular (2244)	<i>On danse / en couple / pour de longues heures / dans ce grand bal.</i>
Irregular (2244)	<i>Luce quitte / à temps / vers le trois juin / sans ses gants noirs.</i>
Irregular (2244)	<i>Il plonge / le soir / du haut du pont / pour être en forme.</i>
Irregular (4422)	<i>Mon frère / le suit / le long des grilles / sans sac à pied.</i>
Irregular (4422)	<i>Ma fille se baigne / les soirs de pluie / au lac / sans honte.</i>
Irregular (4422)	<i>Ce joueur se bat / au cours du match / chaque fois / pour rien.</i>
Irregular (4422)	<i>Jean les a vus / en face des banques / là-bas / en file.</i>
Irregular (4422)	<i>Ses deux filles partent / une fois de plus / trop tôt / sans lui.</i>
Irregular (4422)	<i>La prof a lu / face à la classe / la veille / sans crainte.</i>
Irregular (4422)	<i>On nous a pris / deux jours de suite / sans carte / à Londres.</i>

Note: Each boundary between syntactic groups is represented by a forward slash.

Appendix 2: Figures

Figure 2. Mean values and standard deviations of syllable durations as a function of word position, sentence pattern, and congruence conditions.

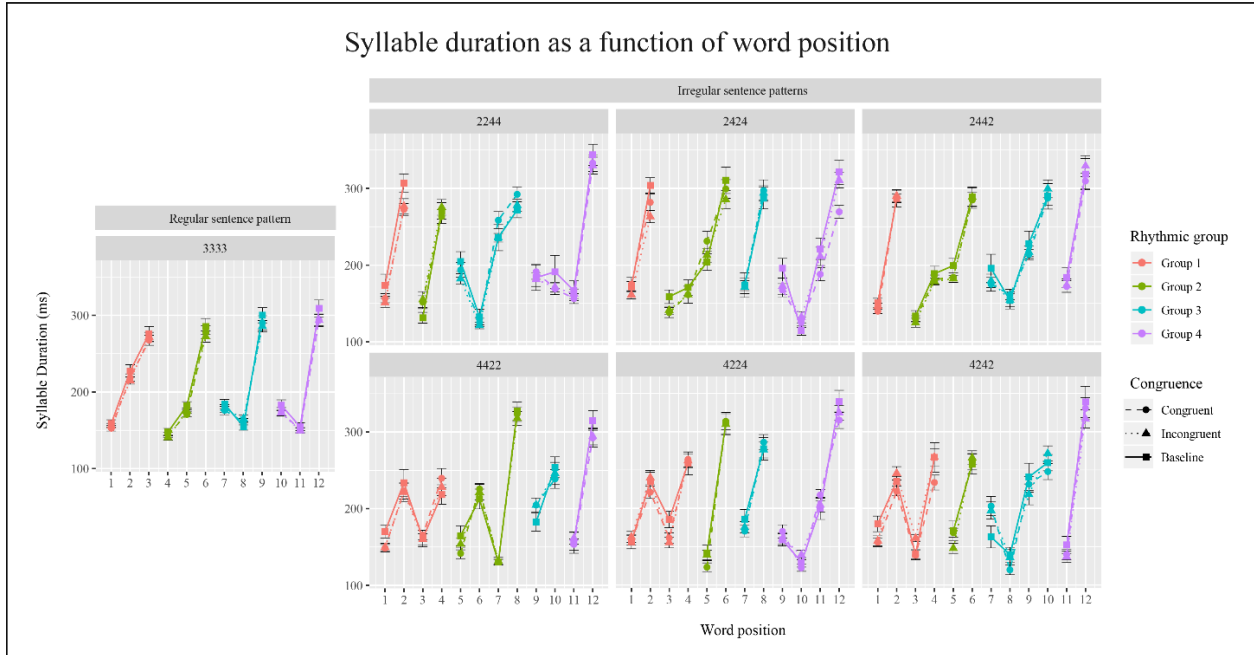


Figure 3. Mean values and standard deviations of FFD as a function of word position, sentence pattern, and congruence conditions.

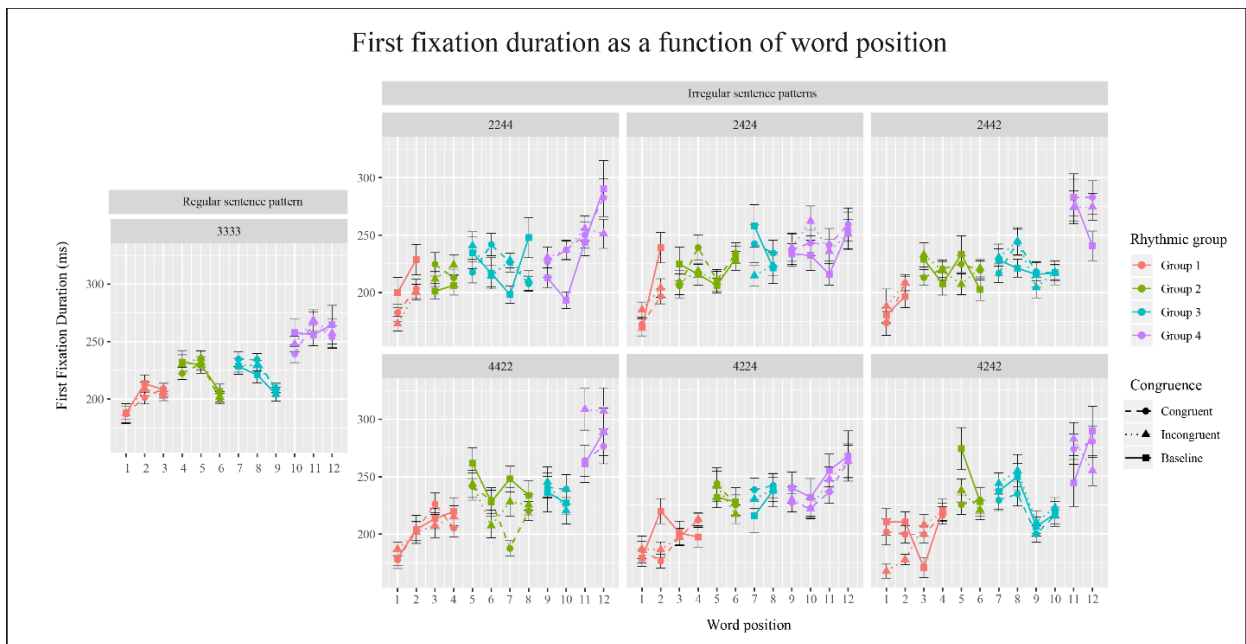


Figure 4. Mean values and standard deviations of GD as a function of word position, sentence pattern, and congruence conditions.

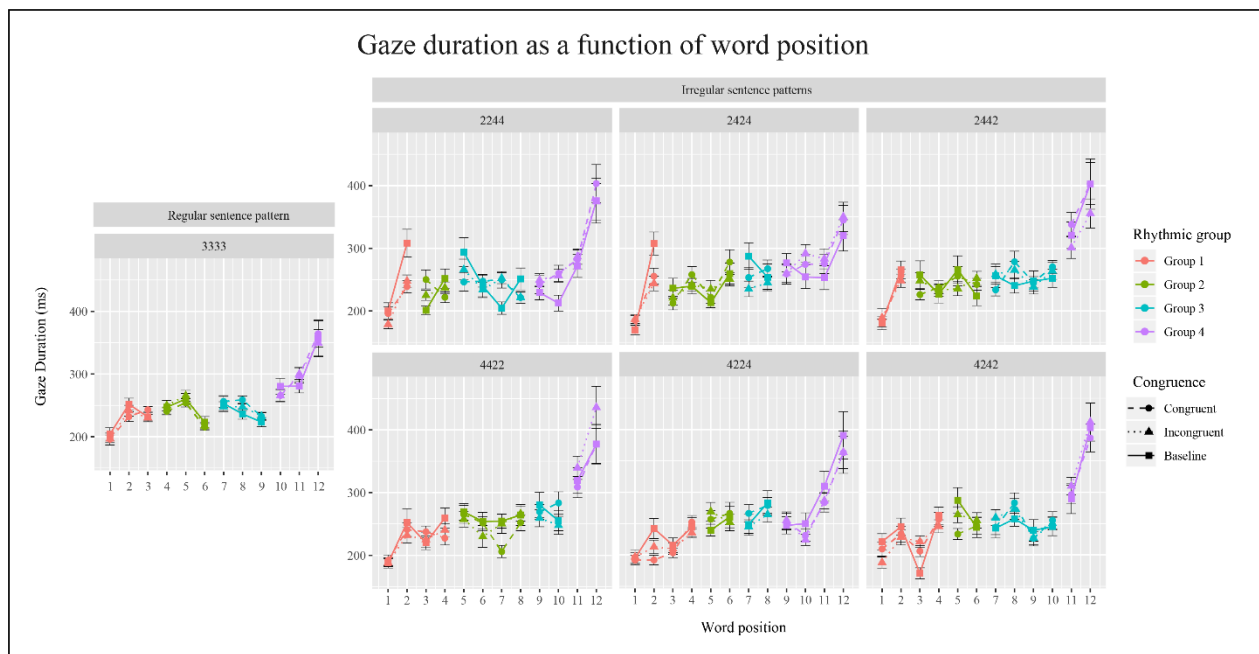
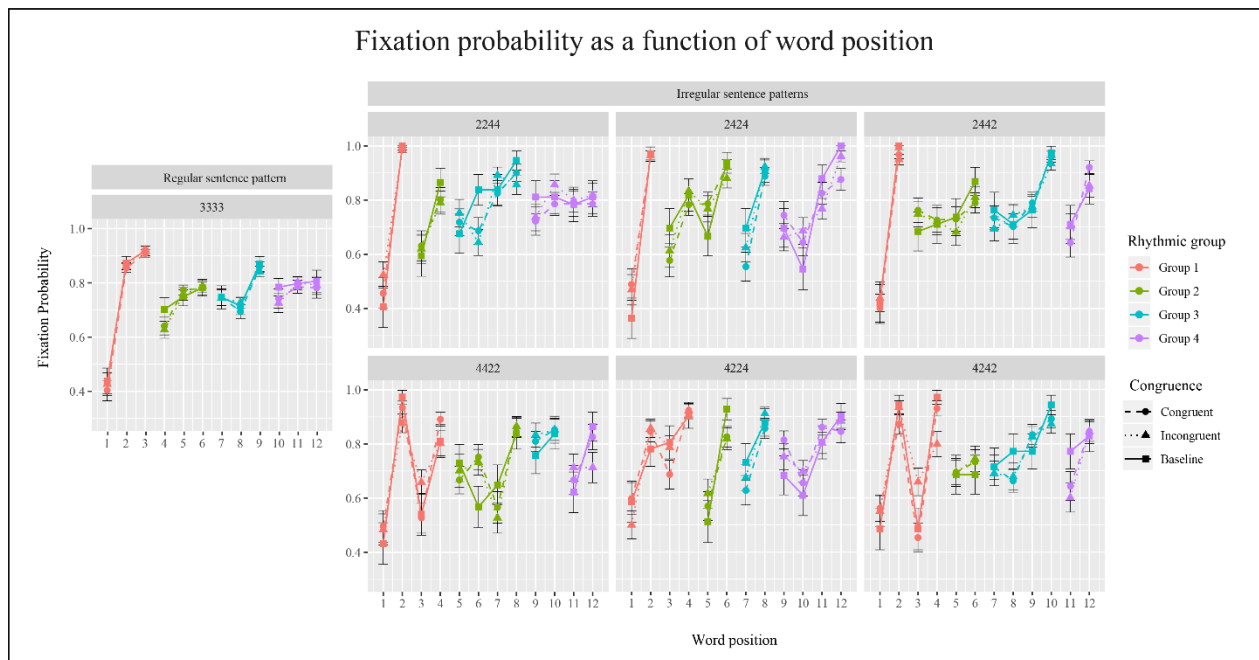


Figure 5. Mean values and standard deviations of ProbF as a function of word position, sentence pattern, and congruence conditions.



3. Discussion et conclusion

3.1. Résultats de l'étude

Un premier objectif de l'étude présentée dans ce mémoire était de tester l'effet d'un amorçage rythmique lors de la lecture de phrases complètes. L'hypothèse était que les effets de congruence sur la lecture de mots simple, documentés dans une série d'études de Gould et collègues (Gould et al., 2016; Gould et al., 2017; Gould et al., 2018), ne se reproduisent pas dans des phrases aux patrons plus complexes, et que ce soit plutôt la rythmique implicite des phrases lues qui soit respectée. Globalement, les résultats confirment cette hypothèse. Ainsi, dans une série d'analyses de variance, on ne retrouve pas d'effet des différents types de congruence rythmique sur le début de lecture de la phrase ou son temps de lecture global, et la congruence n'a pas non plus d'effet évident sur la récitation des séquences syllabiques. Autrement dit, la présentation d'une amorce auditive, qu'elle soit congruente ou incongruente avec le patron rythmique d'une phrase lue, ne semble pas influencer la production orale de séquences verbales en lecture. En fait, comme montré dans deux modèles linéaires mixtes cherchant à prédire la durée de prononciation de chaque mot monosyllabique, on observe plutôt des effets reliés à la position de mot, et ce en interaction avec la régularité rythmique des phrases. L'observation visuelle des données suggère une tendance vers un allongement inter-item de fin de groupe, ce qui est appuyé statistiquement par des analyses cycliques de régressions harmoniques. Loin d'écarter le rôle du rythme en lecture, ce résultat met plutôt l'accent sur la primauté du rythme implicite d'une phrase lors de la lecture à voix haute, illustrant comment la lecture sollicite le rythme de la parole de façon bien particulière. Un tel résultat rejoint certaines études comparatives montrant que la parole lue est un comportement verbal à la rythmicité beaucoup plus régulière que pour la parole spontanée (Guaïtella, 1991, 1999). Pour expliquer ces différences, il est notamment suggéré que la nature « contrainte » d'un texte incite à créer des groupements plus prévisibles que dans une situation de communication spontanée, où des pauses et des hésitations peuvent notamment survenir. Plus récemment, Godde, Bosse et Bailly (2019) montraient dans une revue de la littérature sur la prosodie en lecture que des variables rythmiques considérées comme essentielles à l'évaluation de la prosodie orale (le placement adéquat de pause ainsi que le phrasé approprié) sont directement reliées au niveau de compréhension d'un texte. Les résultats de l'expérience ici présentée montrent que les participants,

des lecteurs de niveau collégial et universitaire, semblent avoir acquis une telle automatisation des processus de lecture, faisant en sorte que la présentation auditive d'une séquence rythmique a peu d'incidence sur leur production de groupements rythmiques durant la lecture d'un texte.

Concernant la seconde partie de l'hypothèse, la congruence n'a pas généralement influencé les variables de mouvements oculaires (FFD, GD, ProbF). Il y avait néanmoins des effets reliés à la position de mot pour les trois variables, et ces effets étaient en interaction avec la régularité de la phrase lue pour ProbF. Cette interaction a été confirmée par une inspection visuelle des données et par des analyses de régressions harmoniques montrant l'émergence de cyclicités dans la relation entre la position du mot et la probabilité de fixation. Ces cyclicités étaient différentes selon la régularité de la phrase lue. Dans l'interprétation de ces résultats, il est important de garder en tête les différences fondamentales entre une quantification de probabilités de fixations et des mesures de durées de fixations comme FFD ou GD. En lecture, la première fixation sur un mot commence en moyenne 500 ms avant d'initier sa prononciation, selon des statistiques impliquant des adultes normo-lecteurs (Inhoff et al., 2011). En revanche, entre une fixation sur un mot et la prononciation de celui-ci, les yeux peuvent poursuivre en ignorant certains mots ou en refixant certains mots sur la ligne. Les résultats ci-dessus montrent donc que des mesures de durées de fixations ne présentent pas de patron rythmique séquentiels, ou bien que des patrons possiblement présents sont embrouillés par ces mouvements complexes de la lecture. À l'inverse, les probabilités de fixations sont moins influencées par les propriétés non-linéaire de l'échantillonnage visuel, et présentent des fluctuations cycliques qui coïncident avec des groupements rythmiques du côté de la parole. Comme relevé plus tôt, il est commun d'observer que des *chunks* émergent spontanément lors de la lecture de listes de mots. Ceci implique que, dans la lecture de séquences d'items verbaux, le *chunking* perceptif s'applique forcément à un certain moment lors du passage d'un code écrit à l'oral. Selon les résultats présentés, des mesures probabilistes de fixations faisant abstraction des mouvements complexes en lecture parviennent à dégager de tels patrons, tel qu'illustré par la correspondance entre des *chunks* dans la récitation orale et les cyclicités de ProbF.

3.2. Limites

Il existe certaines restrictions qui limitent l'interprétation des résultats. La plus importante est probablement que des mesures probabilistes de fixations ne permettent pas d'inférer une séquence de mouvements, mais montrent plutôt un comportement oculomoteur moyenné à travers plusieurs

moments durant la lecture de la phrase. Ainsi, si les mesures de ProbF révèlent bel et bien une forme *chunking* en lecture, cette mesure ne permet pas d'identifier une ligne du temps claire de ce processus. Si cette conversion a lieu à l'intérieur d'un délai entre une fixation et la prononciation d'un mot, il y aurait ici besoin d'une valeur temporelle plus appropriée aux mécanismes de *chunking* en lecture. En second lieu, il est important de noter que les analyses de régressions logistiques présentées révèlent aussi des effets de fréquence de mots importants pour ProbF. Il existe donc une relation entre la fréquence de mot et les probabilités de fixations, et cette association pourrait intervenir dans ce qu'on a interprété jusqu'à maintenant comme représentant des effets de *chunking* perceptif. Dans le contexte de phrases, il apparaît que des lexèmes ou « mots de contenu », par opposition à des morphèmes plus fréquents ou « mots de fonction », tendent à se présenter en position finale de syntagme, même s'il arrive également que des pronoms ou des prépositions soient présents dans cette position. Or, le *chunking* est toujours marqué par des délais inter-item en position finale, peu importe si le groupement se termine par un lexème ou un morphème. En d'autres mots, il est difficile de séparer, dans ces observations, des effets de fréquence de mots d'effets qui émergeraient d'un mécanisme de *chunking*. Néanmoins, il demeure clair que la fréquence de mot ne cause pas de délai inter-item en position finale de groupement pour des variables de durée de syllabe.

3.3. Rythme et lecture : d'autres avenues pour la recherche

Malgré le caractère novateur du paradigme expérimental présenté dans ce mémoire, certaines observations sur la parole et la lecture qui pourraient révéler des liens avec le rythme n'ont pas été touchées. Premièrement, tel que noté par Laubrock et Kliegl (2015), il apparaît que la lecture est un comportement difficile à dissocier du caractère fondamentalement *parlé* de la communication humaine. Par exemple, on apprend typiquement à lire en prononçant des séquences de texte à voix haute, et ce n'est que progressivement que la lecture silencieuse devient plus fréquente. Toutefois, des sources primaires montrent que jusqu'au 8^e siècle, la lecture demeurait une activité orale toute la vie durant, et qu'elle était même vue comme un talent oratoire (Manguel, 1998). De plus, il est aussi avéré que la lecture silencieuse implique souvent une forme de « sous-vocalisation » du texte lu. Dans certaines des premières observations à ce sujet, des enregistrements physiologiques ont montré que la lecture silencieuse implique une activation de muscles de la phonation et de l'articulation, ainsi que des changements sur le plan respiratoire (Edfeldt, 1960; McGuigan, Keller

et Stanton, 1964). Plus récemment, certaines études utilisant de l'IRMf ont révélé que l'impression de « voix intérieure » qui accompagne la lecture silencieuse d'un texte est associée à une activité dans des zones du cerveau reliées à la voix (Kurby, Magliano et Rapp, 2009; Perrone-Bertolotti et al., 2012; Shankweiler et al., 2008; Yao, Belin et Scheepers, 2011). Quant à des études montrant des liens avec le *chunking* perceptif, des expériences utilisant de l'EEG ont montré que la présence d'éléments comme des virgules ou des frontières de phrases en lecture silencieuse évoquent certaines composantes électroencéphalographiques typiquement associées au *chunking* en perception de la parole, comme si les séquences de textes lues sont implicitement « parlées » (Roll, Lindgren, Alter et Horne, 2012; Steinhauer, 2003; Steinhauer et Friederici, 2001). Finalement, plusieurs études portant sur des langues à accent lexical montrent que cette variable prosodique reliée au rythme influence les mouvements oculaires en lecture, comme le temps de fixation (Ashby et Clifton Jr, 2005; Colombo et Zevin, 2009; Kentner, 2012). Dans l'ensemble, il existe donc plusieurs résultats suggérant qu'un texte lu, même silencieusement, sollicite systématiquement des mécanismes reliés à la parole. Or, ce constat a des implications fondamentales quant au paradigme présenté dans ce travail. Si le *chunking* de groupements rythmiques en parole lue possède réellement des corrélats sur le plan des mouvements oculaires, il serait pertinent d'évaluer si ceci s'observe également dans le cas de la parole silencieuse. Dans une telle éventualité, un paradigme expérimental où le rythme prosodique de phrases est manipulé offre une façon de mieux comprendre comment la parole et la prosodie influencent implicitement le traitement visuel de séquences verbales écrites.

Un deuxième aspect qui a moins été abordé par le présent travail concerne les effets de régularité qu'il est possible d'observer dans la perception et la production de la parole. Plusieurs études montrent que le rythme, en procurant une structure temporelle à une séquence verbale, oriente l'auditeur à des moments plus saillants du signal. Par exemple, on peut moduler la perception ou la production du langage en manipulant la régularité de syllabes plus proéminentes sur le plan perceptuel. Or, il est démontré qu'une séquence verbale dont les syllabes plus proéminentes surviennent à cadence plus régulière est généralement mieux perçue qu'une séquence dont la cadence est plus irrégulière, ce qui s'observe notamment par une perception facilitée du contenu phonétique (Pitt et Samuel, 1990; Quené et Port, 2005) ou une meilleure résolution d'ambiguïtés syntaxiques (Roncaglia-Denissen, Schmidt-Kassow et Kotz, 2013). D'autres résultats montrent également qu'une cadence régulière atténue un marqueur neurophysiologique comme le N400, un

potentiel évoqué observé en électroencéphalographie qui survient typiquement lorsqu'on perçoit une unité lexicale sémantiquement imprévisible (Rothermich, Schmidt-Kassow et Kotz, 2012). De façon analogue, la production de la parole peut aussi bénéficier de la présence de patrons d'accents syllabiques réguliers : La production de non-mots ou de séquences alphabétiques sans sens est typiquement accélérée lorsque leur rythme est plus régulier, tout en réduisant les erreurs et les hésitations (Rosenbaum, Weber, Hazelett et Hindorff, 1986; Tilsen, 2011). Dans l'ensemble, de tels résultats tendent à montrer que la présence de régularités temporelles dans la parole facilite sa perception et sa production. Or, dans la présente étude, les résultats montrent que la régularité des phrases lues n'a pas eu d'effet global sur des variables comme la vitesse d'élocution ou le moment du début de la lecture. Autrement dit, les lecteurs ne commençaient pas à lire plus tôt et ne lisaient pas plus rapidement lorsque la phrase comportait des groupements plus réguliers. Les différentes variables explorées en oculométrie n'ont pas non plus été globalement influencées par cette variable. Or, il faut rappeler que les participants à l'étude étaient des lecteurs de niveau collégial et universitaire. Le fait de mener une telle expérience avec des populations de lecteurs moins avancés (p.ex. des enfants, des apprenants du français, ou des individus dyslexiques) pourrait révéler des effets de régularité et de prévisibilité rythmique qui n'étaient pas présents ici. En effet, dans l'éventualité où la prosodie en lecture est un comportement moins automatisé pour certains individus, l'entraînement par un rythme prévisible pourrait potentiellement faciliter l'acquisition de composantes rythmiques en lecture orale. Rappelons que ces préoccupations ne concernent pas que le décodage : tel qu'évoqué plus tôt, de nombreuses études montrent des liens étroits entre la prosodie en parole lue, les compétences de décodage en lecture et la compréhension de textes (Godde et al., 2019). De telles connaissances pourraient notamment contribuer à orienter des méthodes de traitement clinique de la dyslexie qui sont, entre autres, axées sur la musique et le rythme (Patel, 2014; Tierney et Kraus, 2014).

3.4. Conclusion

En résumé, il paraît utile de rappeler quels étaient les objectifs principaux de ce mémoire. De façon générale, on cherchait à tester la présence de patrons rythmiques réguliers ou de cyclicités durant des tâches de lecture qui pourraient expliquer l'existence de lien développementaux entre les habiletés dans des tâches liées au rythme et les compétences de décodage de texte. Une première hypothèse consistait à vérifier qu'un amorçage rythmique n'aurait pas ou peu d'effet sur la

récitation de texte durant la lecture à voix haute, contrairement à des études montrant de tels effets pour la lecture de mots simples. Une deuxième hypothèse consistait à tester la présence de comportements rythmiques dans l'échantillonnage visuel par les mouvements oculaires en lecture, en utilisant deux classes de variables (des durées de fixation et des mesures de probabilités de fixation). Concernant la première hypothèse, il apparaît que des lecteurs génèrent des groupements rythmiques d'information verbale (des *chunks*), et ce indépendamment d'un amorçage rythmique. Ceci est bien illustré par les Figures 1 et 6, qui montrent une tendance à allonger le dernier délai inter-item de chaque groupement. On montre ainsi comment la lecture est, en soi, un comportement résolument rythmique. Concernant la deuxième hypothèse, qui concernait les mouvements oculaires en lecture, on a observé que la variable quantifiant les probabilités de fixation était celle qui variait de façon particulièrement cyclique, et que ces variations étaient comparables aux patrons de *chunking* verbal des participants. Ce résultat est interprété comme indiquant que les probabilités de fixations sont moins influencées par le caractère non-séquentiel de la lecture, et que ce type de variable pourrait représenter un lien entre l'échantillonnage visuel d'un texte et le *chunking* rythmique de la parole. Néanmoins, on mentionne certaines limites dans l'interprétation de ce dernier résultat, surtout en lien avec le caractère non-temporel des probabilités de fixations et l'effet confondant des fréquences de mots. De futures études s'intéressant aux liens entre rythme et lecture auraient avantage à adresser ce problème méthodologique, ainsi qu'à intégrer des conditions de lecture silencieuse et de divers degrés de régularité rythmique. Il est également à noter que des effets différents de ceux observés dans cette expérience pourraient survenir avec des populations de lecteurs moins avancés.

Références bibliographiques

- American Psychiatric Association (2013). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders (DSM-5®)*. (5e^e éd.). Arlington, VA: American Psychiatric Publishing.
- Ashby, J. et Clifton Jr, C. (2005). The prosodic property of lexical stress affects eye movements during silent reading. *Cognition*, 96(3), B89-B100. doi: 10.1016/j.cognition.2004.12.006
- Atterbury, B. W. (1983). A comparison of rhythm pattern perception and performance in normal and learning-disabled readers, age seven and eight. *Journal of Research in Music Education*, 31(4), 259-270. doi: 10.2307/3344629
- Atterbury, B. W. (1985). Musical differences in learning-disabled and normal-achieving readers, aged seven, eight and nine. *Psychology of Music*, 13(2), 114-123. doi: 10.1177/0305735685132005
- Blachman, B. A. (2000). Phonological awareness (*Handbook of reading research* (p. 483-502).
- Boucher, V. J. (2006). On the function of stress rhythms in speech: evidence of a link with grouping effects on serial memory. *Language and speech*, 49(4), 495-519. doi: 10.1177/00238309060490040301
- Boucher, V. J., Gilbert, A. C. et Jemel, B. (2019). The Role of Low-frequency Neural Oscillations in Speech Processing: Revisiting Delta Entrainment. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 31(8), 1-11. doi: 10.1162/jocn_a_01410
- Colombo, L. et Zevin, J. (2009). Stress Priming in Reading and the Selective Modulation of Lexical and Sub-Lexical Pathways. *PLoS One*, 4(9), e7219. doi: 10.1371/journal.pone.0007219
- Cowan, N. (2001). Metatheory of storage capacity limits. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(1), 154-176. doi: 10.1017/S0140525X0161392X
- David, D., Wade-Woolley, L., Kirby, J. R. et Smithrim, K. (2007). Rhythm and reading development in school-age children: a longitudinal study. *Journal of Research in Reading*, 30(2), 169-183. doi: 10.1111/j.1467-9817.2006.00323.x
- De Luca, M., Pontillo, M., Primativo, S., Spinelli, D. et Zoccolotti, P. (2013). The eye-voice lead during oral reading in developmental dyslexia. *Frontiers in human neuroscience*, 7, 696. doi: 10.3389/fnhum.2013.00696
- Dellatolas, G., Watier, L., Le Normand, M.-T., Lubart, T. et Chevrie-Muller, C. (2009). Rhythm reproduction in kindergarten, reading performance at second grade, and developmental dyslexia theories. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 24(6), 555-563. doi: 10.1093/arclin/acp044
- Douglas, S. et Willatts, P. (1994). The relationship between musical ability and literacy skills. *Journal of Research in Reading*, 17(2), 99-107. doi: 10.1111/j.1467-9817.1994.tb00057.x
- Edfeldt, A. W. (1960). *Silent speech and silent reading*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Gilbert, A. C., Boucher, V. J. et Jemel, B. (2015). The perceptual chunking of speech: a demonstration using ERPs. *Brain Research*, 1603, 101-113. doi: 10.1016/j.brainres.2015.01.032
- Giraud, A.-L. et Poeppel, D. (2012). Cortical oscillations and speech processing: emerging computational principles and operations. *Nature neuroscience*, 15(4), 511-517. doi: 10.1038/nn.3063
- Godde, E., Bosse, M.-L. et Bailly, G. (2019). A review of reading prosody acquisition and development. *Reading and Writing*. doi: 10.1007/s11145-019-09968-1

- Goswami, U. (2011). A temporal sampling framework for developmental dyslexia. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(1), 3-10. doi: 10.1016/j.tics.2010.10.001
- Goswami, U. (2017). A Neural Basis for Phonological Awareness? An Oscillatory Temporal-Sampling Perspective. *Current Directions in Psychological Science*, 27(1), 0963721417727520. doi: 10.1177/0963721417727520
- Goswami, U., Thomson, J., Richardson, U., Stainthorp, R., Hughes, D., Rosen, S. et Scott, S. K. (2002). Amplitude envelope onsets and developmental dyslexia: A new hypothesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(16), 10911-10916.
- Goswami, U., Wang, H.-L. S., Cruz, A., Fosker, T., Mead, N. et Huss, M. (2011). Language-universal sensory deficits in developmental dyslexia: English, Spanish, and Chinese. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(2), 325-337. doi: 10.1162/jocn.2010.21453
- Gould, L., McKibben, T., Ekstrand, C., Lorentz, E. et Borowsky, R. (2016). The beat goes on: the effect of rhythm on reading aloud. *Language, cognition and neuroscience*, 31(2), 236-250. doi: 10.1080/23273798.2015.1089360
- Gould, L., Mickleborough, M. J. S., Ekstrand, C., Lorentz, E. et Borowsky, R. (2017). Examining the neuroanatomical and the behavioural basis of the effect of basic rhythm on reading aloud. *Language, cognition and neuroscience*, 32(6), 724-742. doi: 10.1080/23273798.2016.1271135
- Gould, L., Mickleborough, M. J. S., Lorentz, E., Ekstrand, C. et Borowsky, R. (2018). A behavioral and fMRI examination of the effect of rhythm on reading noun-verb homographs aloud. *Language, cognition and neuroscience*, 33(7), 829-849. doi: 10.1080/23273798.2018.1442012
- Graybiel, A. M. et Grafton, S. T. (2015). The striatum: where skills and habits meet. *Cold Spring Harbor perspectives in biology*, 7(8), a021691. doi: 10.1101/cshperspect.a021691
- Guaïtella, I. (1991). *Rythme et parole: comparaison critique du rythme de la lecture oralisée et de la parole spontanée*. (Aix-Marseille 1, Aix-Marseille).
- Guaïtella, I. (1999). Rhythm in speech: What rhythmic organizations reveal about cognitive processes in spontaneous speech production versus reading aloud. *Journal of Pragmatics*, 31(4), 509-523. doi: 10.1016/S0378-2166(98)00079-4
- Hämäläinen, J., Leppänen, P., Torppa, M., Müller, K. et Lyytinen, H. (2005). Detection of sound rise time by adults with dyslexia. *Brain and Language*, 94(1), 32-42.
- Holliman, A., Wood, C. et Sheehy, K. (2008). Sensitivity to speech rhythm explains individual differences in reading ability independently of phonological awareness. *British Journal of Developmental Psychology*, 26(3), 357-367. doi: 10.1348/026151007X241623
- Holliman, A., Wood, C. et Sheehy, K. (2010a). The contribution of sensitivity to speech rhythm and non-speech rhythm to early reading development. *Educational Psychology*, 30(3), 247-267. doi: 10.1080/01443410903560922
- Holliman, A., Wood, C. et Sheehy, K. (2010b). Does speech rhythm sensitivity predict children's reading ability 1 year later? *Journal of educational psychology*, 102(2), 356-366. doi: 10.1037/a0018049
- Howard, M. F. et Poeppel, D. (2010). Discrimination of speech stimuli based on neuronal response phase patterns depends on acoustics but not comprehension. *Journal of Neurophysiology*, 104(5), 2500-2511. doi: 10.1152/jn.00251.2010
- Inhoff, A. W., Solomon, M., Radach, R. et Seymour, B. A. (2011). Temporal dynamics of the eye-voice span and eye movement control during oral reading. *Journal of Cognitive Psychology*, 23(5), 543-558. doi: 10.1080/20445911.2011.546782

- Just, M. A. et Carpenter, P. A. (1980). A theory of reading: From eye fixations to comprehension. *Psychological Review*, 87(4), 329.
- Kelso, J. (1997). Relative timing in brain and behavior: Some observations about the generalized motor program and self-organized coordination dynamics. *Human Movement Science*, 16(4), 453-460. doi: 10.1016/S0167-9457(96)00044-9
- Kentner, G. (2012). Linguistic rhythm guides parsing decisions in written sentence comprehension. *Cognition*, 123(1), 1-20. doi: 10.1016/j.cognition.2011.11.012
- Kliegl, R., Grabner, E., Rolfs, M. et Engbert, R. (2004). Length, frequency, and predictability effects of words on eye movements in reading. *European Journal of Cognitive Psychology*, 16(1-2), 262-284. doi: 10.1080/09541440340000213
- Kohler, K. J. (2009). Rhythm in speech and language. *Phonetica*, 66(1-2), 29-45. doi: 10.1159/000208929
- Kurby, C. A., Magliano, J. P. et Rapp, D. N. (2009). Those voices in your head: Activation of auditory images during reading. *Cognition*, 112(3), 457-461. doi: 10.1016/j.cognition.2009.05.007
- Lakatos, P., Karmos, G., Mehta, A. D., Ulbert, I. et Schroeder, C. E. (2008). Entrainment of neuronal oscillations as a mechanism of attentional selection. *Science*, 320(5872), 110-113. doi: 10.1126/science.1154735
- Large, E. W. et Jones, M. R. (1999). The dynamics of attending: How people track time-varying events. *Psychological Review*, 106(1), 119-159. doi: 10.1037/0033-295X.106.1.119
- Laubrock, J. et Kliegl, R. (2015). The eye-voice span during reading aloud. *Frontiers in psychology*, 6, 1432. doi: 10.3389/fpsyg.2015.01432
- Manguel, A. (1998). *Une histoire de la lecture*. Paris: Éditions Actes Sud.
- McGivern, R. F., Berka, C., Languis, M. L. et Chapman, S. (1991). Detection of deficits in temporal pattern discrimination using the seashore rhythm test in young children with reading impairments. *Journal of Learning Disabilities*, 24(1), 58-62. doi: 10.1177/002221949102400110
- McGuigan, F. J., Keller, B. et Stanton, E. (1964). Covert language responses during silent reading. *Journal of educational psychology*, 55(6), 339-343. doi: 10.1037/h0043772
- Meyler, A. et Breznitz, Z. (2005). Visual, auditory and cross-modal processing of linguistic and nonlinguistic temporal patterns among adult dyslexic readers. *Dyslexia*, 11(2), 93-115. doi: 10.1002/dys.294
- Miller, G. (1962). Decision units in the perception of speech. *IRE Transactions on Information Theory*, 8(2), 81-83. doi: 10.1109/TIT.1962.1057697
- Molinaro, N., Lizarazu, M., Lallier, M., Bourguignon, M. et Carreiras, M. (2016). Out-of-synchrony speech entrainment in developmental dyslexia. *Human Brain Mapping*, 37(8), 2767-2783. doi: doi:10.1002/hbm.23206
- Muneaux, M., Ziegler, J. C., Truc, C., Thomson, J. et Goswami, U. (2004). Deficits in beat perception and dyslexia: evidence from French. *Neuroreport*, 15(8), 1255-1259. doi: 10.1097/01.wnr.0000127459.31232.c4
- Patel, A. D. (2008). *Music, language, and the brain*. New York: Oxford University Press.
- Patel, A. D. (2014). Can nonlinguistic musical training change the way the brain processes speech? The expanded OPERA hypothesis. *Hearing research*, 308, 98-108.
- Peelle, J. E. et Davis, M. H. (2012). Neural oscillations carry speech rhythm through to comprehension. *Frontiers in psychology*, 3.
- Perrone-Bertolotti, M., Kujala, J., Vidal, J. R., Hamame, C. M., Ossandon, T., Bertrand, O., . . . Lachaux, J.-P. (2012). How Silent Is Silent Reading? Intracerebral Evidence for Top-Down

- Activation of Temporal Voice Areas during Reading. *The Journal of Neuroscience*, 32(49), 17554-17562. doi: 10.1523/jneurosci.2982-12.2012
- Pitt, M. A. et Samuel, A. G. (1990). The use of rhythm in attending to speech. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16(3), 564-573. doi: 10.1037/0096-1523.16.3.564
- Power, A., Mead, N., Barnes, L. et Goswami, U. (2013). Neural entrainment to rhythmic speech in children with developmental dyslexia. *Frontiers in human neuroscience*, 7(777). doi: 10.3389/fnhum.2013.00777
- Quené, H. et Port, R. F. (2005). Effects of timing regularity and metrical expectancy on spoken-word perception. *Phonetica*, 62(1), 1-13. doi: 10.1159/000087222
- Rautenberg, I. (2015). The effects of musical training on the decoding skills of German-speaking primary school children. *Journal of Research in Reading*, 38(1), 1-17. doi: 10.1111/jrir.12010
- Rayner, K. (1998). Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. *Psychological Bulletin*, 124(3), 372-422. doi: 10.1037/0033-2909.124.3.372
- Rayner, K. et McConkie, G. W. (1976). What guides a reader's eye movements? *Vision research*, 16(8), 829-837.
- Rayner, K., Pollatsek, A., Ashby, J. et Clifton Jr, C. (2012). *Psychology of reading*. New York: Psychology Press.
- Roll, M., Lindgren, M., Alter, K. et Horne, M. (2012). Time-driven effects on parsing during reading. *Brain and Language*, 121(3), 267-272. doi: [10.1016/j.bandl.2012.03.002](https://doi.org/10.1016/j.bandl.2012.03.002)
- Roncaglia-Denissen, M. P., Schmidt-Kassow, M. et Kotz, S. A. (2013). Speech Rhythm Facilitates Syntactic Ambiguity Resolution: ERP Evidence. *PLoS One*, 8(2), e56000. doi: 10.1371/journal.pone.0056000
- Rosenbaum, D. A., Weber, R. J., Hazelett, W. M. et Hindorff, V. (1986). The parameter remapping effect in human performance: Evidence from tongue twisters and finger fumlbers. *Journal of Memory and Language*, 25(6), 710-725. doi: 10.1016/0749-596X(86)90045-8
- Rothermich, K., Schmidt-Kassow, M. et Kotz, S. A. (2012). Rhythm's gonna get you: Regular meter facilitates semantic sentence processing. *Neuropsychologia*, 50(2), 232-244. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2011.10.025
- Schroeder, C. E. et Lakatos, P. (2009). Low-frequency neuronal oscillations as instruments of sensory selection. *Trends in neurosciences*, 32(1), 9-18. doi: 10.1016/j.tins.2008.09.012
- Schroeder, C. E., Lakatos, P., Kajikawa, Y., Partan, S. et Puce, A. (2008). Neuronal oscillations and visual amplification of speech. *Trends in Cognitive Sciences*, 12(3), 106-113.
- Schroeder, C. E., Wilson, D. A., Radman, T., Scharfman, H. et Lakatos, P. (2010). Dynamics of Active Sensing and perceptual selection. *Current Opinion in Neurobiology*, 20(2), 172-176. doi: 10.1016/j.conb.2010.02.010
- Shankweiler, D., Mencl, W. E., Braze, D., Tabor, W., Pugh, K. R. et Fulbright, R. K. (2008). Reading differences and brain: Cortical integration of speech and print in sentence processing varies with reader skill. *Developmental neuropsychology*, 33(6), 745-775. doi: 10.1080/87565640802418688
- Soltesz, F., Szucs, D., Leong, V., White, S. et Goswami, U. (2013). Differential entrainment of neuroelectric delta oscillations in developmental dyslexia. *PLoS One*, 8(10), e76608. doi: 10.1371/journal.pone.0076608
- Steinhauer, K. (2003). Electrophysiological correlates of prosody and punctuation. *Brain and Language*, 86(1), 142-164. doi: 10.1016/S0093-934X(02)00542-4

- Steinhauer, K. et Friederici, A. D. (2001). Prosodic Boundaries, Comma Rules, and Brain Responses: The Closure Positive Shift in ERPs as a Universal Marker for Prosodic Phrasing in Listeners and Readers. *Journal of Psycholinguistic Research*, 30(3), 267-295. doi: 10.1023/a:1010443001646
- Surányi, Z., Csépe, V., Richardson, U., Thomson, J. M., Honbolygó, F. et Goswami, U. (2009). Sensitivity to rhythmic parameters in dyslexic children: a comparison of Hungarian and English. *Reading and Writing*, 22(1), 41-56. doi: 10.1007/s11145-007-9102-x
- Terrace, H. (2001). Chunking and serially organized behavior in pigeons, monkeys and humans. Dans R. G. Cook (dir.), *Avian visual cognition*.
- Thomson, J. M., Fryer, B., Maltby, J. et Goswami, U. (2006). Auditory and motor rhythm awareness in adults with dyslexia. *Journal of Research in Reading*, 29(3), 334-348. doi: 10.1111/j.1467-9817.2006.00312.x
- Thomson, J. M. et Goswami, U. (2008). Rhythmic processing in children with developmental dyslexia: auditory and motor rhythms link to reading and spelling. *Journal of Physiology-Paris*, 102(1-3), 120-129. doi: 10.1016/j.jphysparis.2008.03.007
- Tierney, A. et Kraus, N. (2013). The ability to tap to a beat relates to cognitive, linguistic, and perceptual skills. *Brain and Language*, 124(3), 225-231. doi: 10.1016/j.bandl.2012.12.014
- Tierney, A. et Kraus, N. (2014). Auditory-motor entrainment and phonological skills: precise auditory timing hypothesis (PATH). *Frontiers in human neuroscience*, 8(949). doi: 10.3389/fnhum.2014.00949
- Tilsen, S. (2011). Metrical regularity facilitates speech planning and production. *Laboratory Phonology*, 2(1), 185. doi: 10.1515/labphon.2011.006
- Wade, N. J. (2010). Pioneers of eye movement research. *i-Perception*, 1(2), 33-68. doi: 10.1068/i0389
- Watkins, K. E., Strafella, A. P. et Paus, T. (2003). Seeing and hearing speech excites the motor system involved in speech production. *Neuropsychologia*, 41(8), 989-994. doi: 10.1016/S0028-3932(02)00316-0
- Whalley, K. et Hansen, J. (2006). The role of prosodic sensitivity in children's reading development. *Journal of Research in Reading*, 29(3), 288-303. doi: 10.1111/j.1467-9817.2006.00309.x
- Wilkes, A. L., Lloyd, P. et Simpson, I. (1972). Pause measures during reading and recall in serial list learning. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 24(1), 48-54. doi: 10.1080/14640747208400267
- Wilson, S. M., Saygin, A. P., Sereno, M. I. et Iacoboni, M. (2004). Listening to speech activates motor areas involved in speech production. *Nature neuroscience*, 7(7), 701. doi: 10.1038/nm1263
- Wolff, P. H. (2002). Timing precision and rhythm in developmental dyslexia. *Reading and Writing: an Interdisciplinary Journal*, 15(1-2), 179-206. doi: 10.1023/A:1013880723925
- Wood, C. (2006). Metrical stress sensitivity in young children and its relationship to phonological awareness and reading. *Journal of Research in Reading*, 29(3), 270-287. doi: 10.1111/j.1467-9817.2006.00308.x
- Yao, B., Belin, P. et Scheepers, C. (2011). Silent reading of direct versus indirect speech activates voice-selective areas in the auditory cortex. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(10), 3146-3152. doi: 10.1162/jocn_a_00022
- Ziegler, J. C. et Goswami, U. (2005). Reading Acquisition, Developmental Dyslexia, and Skilled Reading Across Languages: A Psycholinguistic Grain Size Theory. *Psychological Bulletin*, 131(1), 3-29. doi: 10.1037/0033-2909.131.1.3

**Annexe 1 : Lettre d'information et formulaire de
consentement**

LETTRE D'INFORMATION

Rythme et lecture : effets en temps réel du *chunking* perceptif

Bonjour,

Vous êtes invité à participer à une étude dans le cadre de mon projet de recherche de maîtrise, qui porte sur l'effet du rythme sur la performance en lecture. Afin de vous permettre de décider si vous êtes intéressé ou non à participer, veuillez considérer les informations suivantes.

Pour participer, vous devez être âgé entre 18 et 30 ans et avoir le français comme langue maternelle (appris avant l'âge scolaire). Vous ne pourrez pas participer dans les cas suivants : si vous avez reçu un diagnostic de trouble d'apprentissage de la lecture (p.ex. dyslexie), un diagnostic de trouble de l'audition (p.ex. surdité) ou si vous êtes une personne non-voyante.

La participation implique de vous déplacer au Laboratoire des sciences phonétiques de l'Université de Montréal (9^e étage du 3150, rue Jean-Brillant) selon une case horaire qui vous convient. Une fois sur place, votre participation dure environ 1 heure, et implique de participer à deux types de tâches. Dans une première étape, vous répondez à des questionnaires et des exercices visant à évaluer la mémoire de travail et la performance en lecture. Dans une deuxième étape, on présente une tâche de lecture qui implique d'enregistrer les mouvements des yeux grâce à un système d'oculométrie (voir Figure 1). Tout au long de l'expérience, on utilise un microphone pour enregistrer votre voix lors des tâches de lecture à voix haute.



Figure 1: Système d'oculométrie Eyelink 1000

Bien qu'il n'y ait pas de risques particuliers associés aux tâches, il est possible que vous ressentiez une anxiété à l'idée qu'on évalue votre performance en mémoire et en lecture. Sachez que les résultats sont recueillis sur un ensemble de participants, et ne sont pas analysés de façon individuelle. De plus, il est possible que le système d'oculométrie provoque un léger inconfort, puisque qu'il requiert de stabiliser votre tête en appuyant votre front contre un support placé devant l'écran. Cependant, ce support n'est pas contraignant, et il y a des pauses tout au long du test pour vous dégager et vous détendre. Bien qu'il n'y ait pas d'avantage à participer à ce projet, vous contribuerez néanmoins à comprendre l'effet du rythme sur la lecture, et pourrez obtenir sur demande les résultats de votre performance en lecture après votre participation.

En participant à cette étude, toutes les informations que nous recueillons à votre sujet demeurent strictement confidentielles. Si vous êtes intéressé(e) à participer, ou que vous souhaitez obtenir plus d'information, référez-vous aux coordonnées ci-dessous. Sachez que votre participation à cette étude est entièrement volontaire, et que vous aurez à signer un formulaire de consentement sur place dans l'éventualité où vous souhaitez participer.

Merci pour votre intérêt,

Antonin Rossier-Bisaillon

Étudiant à la maîtrise en linguistique
Laboratoire de Sciences phonétiques de l'Université de Montréal
antonin.rossier-bisaillon@umontreal.ca
Bur. : (514) 343-5672 / Cell. : -

FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT

Rythme et lecture : effets en temps réel du *chunking* perceptif

Nous sollicitons la participation d'étudiant(e)s âgé(e)s de 18 à 30 ans ayant le français pour langue maternelle, avec une vision normale ou corrigée et n'éprouvant aucun trouble d'audition ou d'apprentissage de la lecture.

Objectifs de la recherche.

Ce projet vise à mieux comprendre l'effet du rythme sur la performance en lecture.

Participation à la recherche

L'étude dure environ 45 minutes et implique de participer à deux types de tâches. Dans une première étape, le participant répond à des questionnaires et des exercices visant à évaluer la mémoire de travail et la performance en lecture. Dans une deuxième étape, on présente une tâche de lecture déclinée en plusieurs essais. Chaque essai implique d'écouter une séquence rythmique (construite à partir de tons mélodiques ou de parole), de lire immédiatement une phrase présentée sur un écran, puis de se rappeler si un nouveau mot affiché à l'écran était présent ou non dans la phrase. Durant cette tâche, les mouvements des yeux sont enregistrés par un système d'oculométrie (illustré ci-dessous, Figure 1). Tout au long de l'expérience, on utilise un microphone pour enregistrer la voix du participant dans certaines des tâches de lecture.



Figure 1: Système d'oculométrie Eyelink 1000

Risques et inconvénients

Bien qu'il n'y ait pas de risques particuliers associés aux tâches, il est possible que vous ressentiez une anxiété à l'idée qu'on évalue votre performance en mémoire et en lecture. Sachez que les résultats sont recueillis sur un ensemble de participants, et ne sont pas analysés de façon individuelle. De plus, il est possible que le système d'oculométrie provoque un léger inconfort, puisque qu'il requiert de stabiliser votre tête en appuyant votre front contre un support placé devant l'écran. Cependant, ce support n'est pas contraignant, et il y a des pauses tout au long du test pour vous dégager et vous détendre.

Avantages et bénéfices

Il n'y a pas d'avantage à participer à ce projet. Vous contribuerez néanmoins à comprendre l'effet du rythme sur la lecture, et pourrez obtenir sur demande les résultats de votre performance en lecture après votre participation.

Confidentialité

Vos renseignements et vos résultats aux différentes tâches de l'expérience demeureront confidentiels. On attribue un numéro aux résultats obtenus, et seuls l'étudiant-chercheur et le professeur responsable ont accès aux données qui sont conservées dans un lieu verrouillé au Laboratoire des sciences phonétiques. Ces données seront conservées 7 ans après la fin du projet. Seules les données ne permettant pas de vous identifier seront conservées après cette période.

Droit de retrait

Votre participation à ce projet est entièrement volontaire et vous pouvez à tout moment vous retirer de la recherche par un simple avis verbal, sans préjudice et sans devoir justifier votre décision. Si vous décidez de vous retirer de la recherche, veuillez communiquer avec les chercheurs aux coordonnées indiquées ci-dessous. Dans cette éventualité, tous les renseignements et données qui vous concernent seront détruits, incluant les enregistrements audios de votre voix. Cependant, après la publication des résultats, il sera impossible de d'éliminer les résultats portant sur votre participation.

Professeur responsable

Victor J. Boucher
Laboratoire des sciences phonétiques
3150, rue Jean-Brillant
Université de Montréal
Tél. : 514-343-5672
victor.boucher@umontreal.ca

Étudiant-chercheur:

Antonin Rossier-Bisaillon
idem
antonin.rossier-bisaillon@umontreal.ca

Pièce jointe : FORMULAIRE DE CONSENTEMENT

FORMULAIRE DE CONSENTEMENT

Rythme et lecture : effets en temps réel du chunking perceptif

Déclaration du participant

- Je comprends que je peux prendre mon temps pour réfléchir avant de donner mon accord ou non à participer à la recherche.
- Je peux poser des questions à l'équipe de recherche et exiger des réponses satisfaisantes.
- Je comprends qu'en participant à ce projet de recherche, je ne renonce à aucun de mes droits ni ne dégage les chercheurs de leurs responsabilités.
- J'ai pris connaissance du présent formulaire d'information et de consentement et j'accepte de participer au projet de recherche.

Signature du participant : _____ Date : _____

Nom : _____ Prénom : _____

Engagement du chercheur

J'ai expliqué au participant les conditions de participation au projet de recherche. J'ai répondu au meilleur de ma connaissance aux questions posées et je me suis assuré de la compréhension du participant. Je m'engage, avec l'équipe de recherche, à respecter ce qui a été convenu au présent formulaire d'information et de consentement.

Signature du chercheur : _____ Date : _____
(ou de son représentant)

Nom : _____ Prénom : _____

Pour toute question relative à l'étude, ou pour vous retirer de la recherche, veuillez communiquer avec Victor J. Boucher ou Antonin Rossier-Bisaillon aux coordonnées ci-dessous.

Pour toute préoccupation sur vos droits ou sur les responsabilités des chercheurs concernant votre participation à ce projet, vous pouvez contacter le Comité d'éthique de la recherche en arts et en sciences par courriel à l'adresse ceras@umontreal.ca ou par téléphone au 514 343-7338 ou encore consulter le site Web <http://recherche.umontreal.ca/participants>.

Toute plainte relative à votre participation à cette recherche peut être adressée à l'ombudsman de l'Université de Montréal en appelant au numéro de téléphone 514 343-2100 ou en communiquant par courriel à l'adresse ombudsman@umontreal.ca (**l'ombudsman accepte les appels à frais virés**).

Professeur responsable

Victor J. Boucher
Laboratoire des sciences phonétiques
3150, rue Jean-Brillant
Université de Montréal
Tél. : 514-343-5672
victor.boucher@umontreal.ca

Étudiant-chercheur:

Antonin Rossier-Bisaillon
idem
antonin.rossier-bisaillon@umontreal.ca