



**HAL**  
open science

# Etude développementale de l'intégration spatiale de l'information orthographique durant la lecture de mots dans le paradigme de la Flankers Task

Christophe Cauchi

► **To cite this version:**

Christophe Cauchi. Etude développementale de l'intégration spatiale de l'information orthographique durant la lecture de mots dans le paradigme de la Flankers Task. Psychologie. Université Lumière - Lyon II, 2022. Français. NNT : 2022LYO20014 . tel-04057654

**HAL Id: tel-04057654**

**<https://theses.hal.science/tel-04057654v1>**

Submitted on 4 Apr 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N° d'ordre NNT : 2022LYO20014

# THÈSE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ LUMIÈRE LYON 2

**École Doctorale : ED 476  
Neurosciences et Cognition**

Discipline : Psychologie cognitive

Soutenue publiquement le 17 novembre 2022, par :

**Christophe CAUCHI**

---

## **Étude développementale de l'intégration spatiale de l'information orthographique durant la lecture de mots dans le paradigme de la Flankers Task.**

---

Devant le jury composé de :

Séverine CASALIS, Professeure des universités, Université Lille 3, Présidente

Ludovic FERRAND, Directeur de recherche, CNRS, Rapporteur

Stéphanie DUCROT, Chargée de recherche CNRS, Université Aix Marseille, Examinatrice

Bernard LÉTÉ, Professeur des universités, Université Lumière Lyon 2, Co-Directeur de thèse

Jonathan GRAINGER, Directeur de recherche, CNRS, Co-Directeur de thèse

# Contrat de diffusion

Ce document est diffusé sous le contrat *Creative Commons* « [Paternité – pas de modification](#) » : vous êtes libre de le reproduire, de le distribuer et de le communiquer au public à condition d'en mentionner le nom de l'auteur et de ne pas le modifier, le transformer ni l'adapter.

# THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON

effectuée au sein de  
L'Université Lumière Lyon 2  
& CNRS

Unités de rattachement  
Laboratoire d'Étude des Mécanismes Cognitifs, Université Lyon 2  
&  
Laboratoire de Psychologie Cognitive, CNRS & Aix-Marseille Université

École Doctorale 476  
Neurosciences et Cognition

Spécialité Psychologie Cognitive

Soutenue le 17 novembre 2022, par

**CHRISTOPHE CAUCHI**

## **Étude développementale de l'intégration spatiale de l'information orthographique durant la lecture de mots dans le paradigme de la Flankers Task**

### Composition du Jury

Pr. Séverine Casalis, CNRS & Université de Lille

Rapporteur / Présidente du jury

Dr. Ludovic Ferrand, CNRS & Université Clermont Auvergne

Rapporteur

Cr. Stéphanie Ducrot, CNRS & Aix Marseille Université

Examinatrice

Dr. Jonathan Grainger, CNRS & Aix Marseille Université

Co-directeur de thèse

Pr. Bernard Lété, EMC, Université Lyon 2

Co-directeur de thèse

## Remerciements

Je remercie mes directeurs de thèse Bernard Lété et Jonathan Grainger pour leur disponibilité, leur confiance et l'encadrement de qualité dont ils m'ont fait bénéficier.

Un remerciement appuyé au rectorat de l'académie de Lyon, aux enseignants et aux chefs d'établissements du primaire et du secondaire qui, en dépit d'une période difficile, ont maintenu les portes de l'école ouvertes à la recherche. Il s'agit de Catherine Thomasset, Directrice de l'école élémentaire Claudius Berthelier, de Samuel Roche, Principal du collège Marcel Dargent, d'Emma Bernard, Coordinatrice, et de Pierre Daumas, Directeur de l'école Marcel Pagnol.

Je remercie les chercheurs talentueux avec qui j'ai pu collaborer au cours de ce doctorat : Elisabeth Beyersmann, Jonathan Mirault et Joshua Snell.

À tous les membres de l'équipe *Cognition des Apprentissages et du Langage* Stéphanie Massol, Royce Anders, Eddy Cavalli qui m'ont soutenu et encouragé. Aux collègues doctorants de CAL Elise Lefevre, Brice Brossette et Felipe Pedraza. À mes collègues de bureau Federico Curzel et Geoffrey Duran avec qui j'ai eu le plaisir à cohabiter. Je remercie l'ensemble des titulaires et doctorants du laboratoire EMC pour ces trois années passées ensemble.

Je remercie Séverine Casalis, Stéphanie Ducrot et Ludovic Ferrand, Jury de cette thèse pour avoir accepté d'expertiser ce travail.

*À Charles, né pendant l'écriture de ce manuscrit.*

## Résumé

Le but de cette thèse a été d'étudier les trajectoires développementales des processus impliqués dans l'intégration spatiale des informations linguistiques pendant la lecture de mots en utilisant la flankers task. Plus précisément, nous avons étudié l'impact des flankers orthographiques, phonologiques et morphologiques sur le traitement du mot central chez des enfants apprentis lecteurs et des adultes lecteurs experts. Cette thèse présente quatre études. La première étude a été menée uniquement chez l'adulte et a montré que les effets observés dans la flankers task étaient inhérents au chevauchement des informations orthographiques et que les informations phonologiques n'intervenaient pas dans ces effets. La seconde étude a testé des enfants (grade 1-6) et a mis en évidence que l'effet des flankers pouvaient s'observer dès la première année d'apprentissage de la lecture. La troisième étude a testé l'impact des informations morphologiques chez des enfants d'âge scolaire (grade 3-5) et chez des adultes en montrant que pour qu'il soit observé, cet impact de la morphologie nécessite une certaine expertise en lecture. Le quatrième et dernier travail a testé des enfants d'âge scolaire (grade 1-5) et des adultes, et a démontré que le biais attentionnel pour les informations situées à droite du mot fixé relève davantage du développement de facteurs cognitifs que d'une spécialisation hémisphérique innée pour la lecture. Nous discutons de l'apport théorique de ces recherches, de la prise en compte de ces résultats au sein du modèle de lecture de phrases OB1-reader (Snell et al., 2018 ; Meeter et al., 2020), et de l'importance de l'étude du mot écrit chez l'enfant.

## **Abstract**

This thesis aimed to study the developmental trajectories involved in the spatial integration of linguistic information during word reading using the flankers task. More specifically, we tested the impact of orthographic, phonological and morphological flankers on processing both of the central word target in adults and beginning readers. This thesis presents four studies. The first study was conducted on adults only comparing the contribution of both orthographic and phonological to the flanker effect, and showing that this effect was primarily driven by orthographic overlap. The second study tested children from grades 1-6 and revealed that, from the earliest stages of reading development, orthographic processing can extend beyond single words. The third study tested the impact of morphological information in primary school children (grade 3-5) and in adults, showing that morphological decomposition processes spanning multiple words takes several years to develop. The latest fourth work tested both primary school children (grades 1-5) and adult participants and showed that the rightward bias is driven by attentional asymmetries that develop during the process of learning to read, and not by innate hemispheric specialization for processing linguistic information. We discuss the theoretical contribution of this research, its implications for the understanding of the spatial integration of linguistic information in young readers, and how these results can be accounted by current models of skilled sentence reading such as OB1-reader (Snell et al., 2018; Meeter et al., 2020).



# Table des matières

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Résumé</b> .....   | <b>1</b>  |
| <b>Abstract</b> .....   | <b>2</b>  |
| <b>Table des matières</b> .....   | <b>3</b>  |
| <b>Introduction</b> .....   | <b>7</b>  |
| <b>Chapitre 1. Cadre théorique</b> .....  | <b>19</b> |
| 1.1 Modèles de la lecture de mots et codage de l'information spatiale et orthographique.....                              | 19        |
| 1.1.1 Les premiers systèmes de codage de l'information orthographique.....  | 20        |
| 1.1.2 Le niveau des sous-représentations en modélisation.....   | 24        |
| 1.1.3 Le modèle <i>OB1-reader</i> .....   | 28        |
| 1.2 Le paradigme Flankers Task.....   | 33        |
| 1.2.1 Un bref historique de la Flankers Task.....   | 33        |
| 1.2.2 L'étude de Dare et Shillcock (2013).....  | 35        |
| 1.2.3 Un effet contre intuitif.....   | 37        |
| 1.2.4 Une simulation de l'effet flankers par le modèle <i>OB1-reader</i> .....  | 40        |
| <b>Chapitre 2 – Etude 1 : Analyses des contributions orthographiques et phonologiques au <i>flanker effects</i></b> ..... | <b>44</b> |
| 2.1 Positionnement théorique.....   | 44        |
| 2.2 Orthographic and phonological contributions to flankers effects.....  | 47        |
| Abstract.....   | 48        |
| Introduction.....   | 49        |
| Experiment 1.....   | 52        |

|  |           |
|--|-----------|
| Experiment 2 .....   | 57        |
| Combined analysis .....  | 60        |
| Discussion.....  | 61        |
| General discussion .....   | 62        |
| Acknowledgments.....   | 67        |
| 2.3 Conclusion.....  | 68        |
| <b>Chapitre 3 – Les études développementales.....</b>  | <b>69</b> |
| 3.1 Les modèles développementaux de l'identification du mot écrit.....                                     | 70        |
| 3.1.1 Le modèle <i>E-Z Reader</i> .....  | 72        |
| 3.1.2 Une simulation développementale du modèle <i>E-Z Reader</i> .....                                    | 76        |
| 3.1.3 <i>E-Z Reader</i> et <i>OB1-reader</i> ou différentes approches de la lecture de phrases.....        | 79        |
| 3.2 Le développement de l'empan perceptif.....   | 82        |
| 3.2.1 La taille de l'empan perceptif et ses composantes en fonction de l'âge.....                          | 83        |
| 3.2.2 Tranches d'âges pivot pour le développement de l'empan perceptif .....                               | 85        |
| 3.3 Le développement du traitement en parafovéa .....  | 89        |
| 3.3.1 Le traitement de l'identité des lettres en parafovéa chez l'enfant.....                              | 89        |
| 3.3.2 Un codage relatif de l'identité des lettres en parafovéa chez l'enfant ?.....                        | 93        |
| <b>Chapitre 4 – Etude 2 : l'attention s'étend au-delà du mot fixé chez les lecteurs débutants</b><br>..... | <b>97</b> |
| 4.1 Positionnement théorique.....  | 97        |
| 4.2 Attention extends beyond single words in beginning readers.....  | 99        |

|  |            |
|--|------------|
| Abstract.....  | 100        |
| Introduction.....  | 101        |
| The present study.....   | 104        |
| Methods.....   | 107        |
| Results .....  | 110        |
| Discussion.....  | 116        |
| 4.3 Conclusion Chapitre 4.....   | 123        |
| <b>Chapitre 5 - Etude 3 : Une perspective développementale du traitement de la morphologie dans la flankers task .....</b> | <b>124</b> |
| 5.1 Positionnement théorique.....  | 124        |
| 5.2 A developmental perspective on morphological processing in the flankers task .....                                     | 126        |
| Abstract.....  | 127        |
| Introduction.....  | 128        |
| Method.....  | 132        |
| Results .....  | 138        |
| Discussion.....  | 144        |
| 5.3 Conclusion Chapitre 5.....   | 150        |
| <b>Chapitre 6 - Etude 4 : Les trajectoires de développement du biais d'asymétrie attentionnelle en lecture .....</b>       | <b>151</b> |
| 6.1 Positionnement théorique.....  | 151        |
| 6.2 On the developmental trajectory of directional biases in reading: Evidence from the flankers task.....                 | 153        |

|  |            |
|--|------------|
| Abstract.....  | 154        |
| Introduction.....  | 155        |
| Method.....  | 158        |
| Results .....  | 163        |
| Discussion.....  | 166        |
| 6.3 Conclusion Chapitre 6.....                               | 169        |
| <b>Chapitre 7 - Conclusion générale .....</b>                | <b>170</b> |
| <b>Chapitre 8 – Perspectives de recherches futures.....</b>  | <b>181</b> |
| 8.1 Theoretical background .....                             | 182        |
| 8.2 Pilot study .....  | 185        |
| 8.3 Present project.....                                     | 188        |
| <b>References .....</b>                                      | <b>196</b> |
| <b>Annexes .....</b>   | <b>225</b> |
| Annexe 1 – Stimuli (mots) utilisés dans l'étude 1.....       | 225        |
| Annexe 2 – Stimuli (mots) utilisés dans l'étude 2.....       | 227        |
| Annexe 3A – Stimuli (mots) utilisés dans l'étude 3 .....     | 230        |
| Annexe 3B – Tableaux de synthèse des ANOVA de l'étude 3..... | 232        |
| Annexe 4A – Stimuli (mots) utilisés dans l'étude 4 .....     | 234        |
| Annexe 4B – Filtre des participants de l'étude 4.....        | 237        |
| <b>Déclaration .....</b>                                     | <b>238</b> |

## Introduction

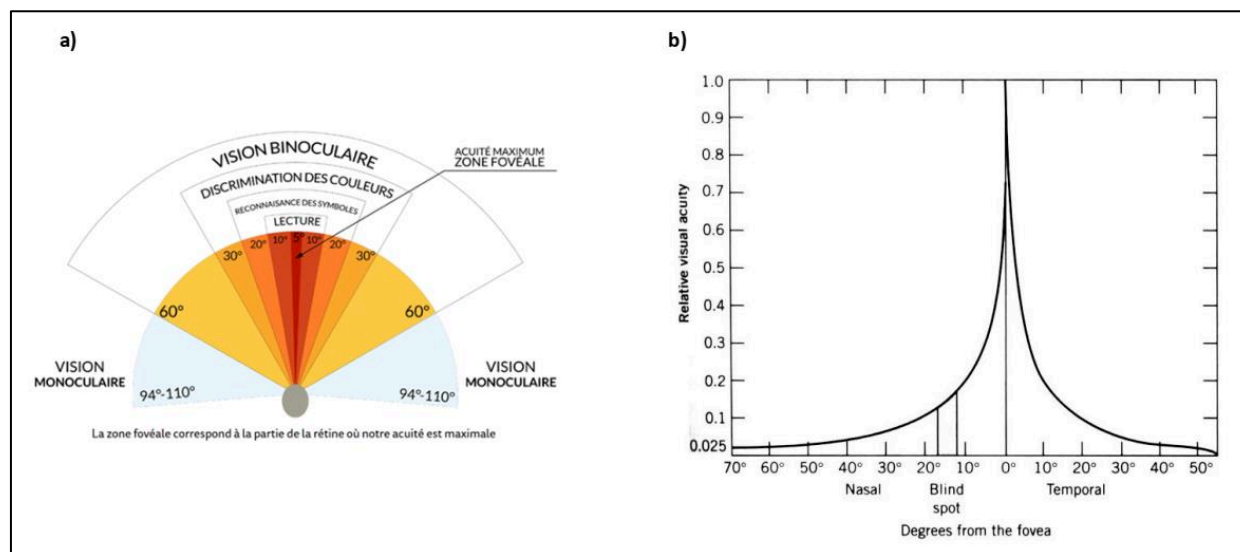
La lecture est l'une des activités cognitives la plus sollicitée chaque jour par les humains du monde lettré. Cette activité implique le traitement de chaînes de caractères inscrits sur une surface plane afin d'en extraire un sens, et d'accéder à la compréhension. La mise en œuvre de ce traitement de l'information écrite et des processus qui en découlent n'est cependant pas innée et relève d'un apprentissage long et coûteux. Ce n'est qu'après un grand nombre d'expositions au langage écrit que la maîtrise de ces traitements devient effective et définitive, à la condition que cet apprentissage ait débuté à un âge précoce (Mol & Bus, 2011). Au niveau neuronal, l'apprentissage de la lecture nécessite la mise en place d'un réseau qui viendra modifier de façon définitive les structures cérébrales (Yamada et al., 2011). Une fois son installation effectuée, ce réseau s'activera de façon irrésistible au contact des éléments lexicaux que sont les mots. Stroop (1935) nous en a fait la plus illustre démonstration avec le célèbre test de dénomination de couleurs, impitoyable pour les patients souffrants de troubles frontaux et notamment de troubles de l'inhibition. En effet, ce test laisse observer qu'il est très coûteux d'inhiber la lecture du mot au profit de la dénomination de la couleur de l'encre avec laquelle il est écrit, venant souligner de ce fait le caractère irrésistible de l'activation du traitement du mot, dès lors que ce dernier est rendu visible au lecteur.

Si la lecture peut faire voyager le lecteur dans le temps et dans l'espace, l'activité de lecture s'inscrit assurément dans l'espace et s'exécute dans le temps. Le système neuro-visuel doit se spécialiser progressivement pour le traitement d'unités grapho-linguistiques contenues dans des mots de tailles différentes, réparties sur un axe horizontal, et séparées

par des espaces. Pour acquérir continuellement les informations alignées les unes à côté des autres, le regard du lecteur se déplace horizontalement à l'aide de saccades oculaires qui suivent des trajectoires balistiques pour atterrir généralement au centre droit du mot suivant où sera déclenché une nouvelle saccade oculaire. La recherche en oculométrie a estimé que la taille moyenne d'une saccade est d'environ 4-5 caractères à la 2<sup>ème</sup> année d'apprentissage de la lecture, et se rapproche de celle du lecteur expert à partir de la 6<sup>ème</sup> année d'apprentissage avec une taille définitive de 7-8 caractères (soit 2° d'angle visuel). La durée d'une fixation sur un mot varie également entre l'apprenti lecteur et le lecteur expert ; elle est d'environ 300-350 ms chez l'enfant et se réduit jusqu'à 200 ms chez l'adulte (Rayner & McConkie, 1976 ; Rayner, 1986). Au cours de l'apprentissage de la lecture, le système neuro-visuel opère des traitements de plus en plus efficaces non seulement parce qu'il se développe mais également parce qu'il s'adapte aux propriétés du système d'écriture. Les effets du point optimal de fixation sont un marqueur de cette adaptation du système neuro-visuel à un système d'écriture particulier. On sait par exemple que la lecture de l'alphabet Latin, se lisant de gauche à droite, implique que le regard du lecteur se positionne sur le centre gauche du mot qui doit être lu afin de le traiter plus rapidement (Ducrot & Pynte, 2002 ; O'Regan et al., 1984), alors que c'est l'inverse pour le regard du lecteur lisant de droite à gauche l'Abjad, *i.e.*, l'alphabet arabe (*e.g.*, Deutsch & Rayner, 1999). Si les langages écrits ont pu évoluer avec la nécessité d'être plus facilement décodables et accessibles, il n'empêche que bon nombre d'effets interviennent au cours de l'activité de lecture et lui sont strictement propre ; ils ne s'observent dans aucune autre activité neuro-visuelle.

Il va de soi que le système visuel n'est pas uniquement conçu pour lire. Il se spécialise pour l'activité de lecture avec, à sa charge, un bagage anatomique assez complexe. En effet,

l'œil est formé de plusieurs régions qui impliquent une gradation de l'acuité visuelle en fonction de l'excentricité, *i.e.*, une très bonne acuité au centre du regard et un effondrement de l'acuité dans les régions excentrées. L'acuité visuelle quand l'œil fixe un mot est généralement mesurée en fonction de trois zones sur la surface rétinienne (cf. Figure 1). La fovéa recouvre 2° d'angle visuel, c'est la zone centrale de l'œil où l'acuité est maximale. La parafovéa recouvre 2 à 5° d'angle visuel, l'acuité chute de 50% par rapport à la fovéa. Enfin, la péri-fovéa, ou zone périphérique, s'étend au-delà de 5° d'angle visuel. L'acuité s'effondre drastiquement : à 6°30', elle a perdu 75% de sa précision. Du fait de ce partitionnement, on peut entrevoir que ces contraintes anatomiques peuvent conditionner fortement l'activité de lecture. Le cerveau doit amener le mot en fovéa car c'est la région d'acuité maximale. Il doit ensuite déplacer le regard pour acquérir une nouvelle information.



**Figure 1.** Les zones de vision en panneau (a). Diagramme de la chute de l'acuité visuelle en fonction de la distance à la fovéa (œil droit) en panneau (b).

La zone qui permet d'extraire de l'information écrite est appelée fenêtre visuo-attentionnelle. Cette fenêtre s'étend au-delà de l'unique zone fovéale et permet de traiter environ 11 caractères entre la 2<sup>ème</sup> et la 3<sup>ème</sup> année d'apprentissage et 14-15 caractères entre

la 6<sup>ème</sup> année d'apprentissage jusqu'à l'âge adulte où l'on parle d'expertise en lecture (McConkie & Rayner, 1975 ; Rayner, 1986). On considère que la fenêtre visuo-attentionnelle se déplace avec le regard du lecteur (attention exogène) mais que l'attention se déplace également à l'intérieur de cette fenêtre (attention endogène ; Henderson, 1992 pour une revue). À ce titre, les enjeux ont été de comprendre comment les processus attentionnels sont intriqués avec les processus de traitement de l'information écrite.

Les recherches sur la lecture ont longtemps considéré que la fovéa était l'unique zone qui permet un traitement profond du mot ; la parafovéa, quant à elle, n'intervenait pas dans le traitement du mot. On pensait que son rôle était principalement de prétraiter le nombre de caractères se trouvant à la droite du mot fixé grâce aux espaces entre les mots (voir Rayner, 1975) pour viser correctement le centre du mot suivant lors de la saccade. Les premières études qui ont tenté de concevoir la parafovéa comme une zone qui participe au traitement linguistique du mot n'ont d'ailleurs pas été très concluantes (voir *e.g.*, Carpenter & Just, 1983 ; Henderson & Ferreira, 1993 ; Rayner et al., 1998). Ce n'est que plus tardivement que des données ont apporté les preuves que la parafovéa est impliquée dans le traitement du mot, en montrant que les propriétés d'un item en parafovéa pouvaient avoir des effets directs sur le mot traité en fovéa (*e.g.*, Inhoff et al., 2000 ; Kennedy et al., 2002).

Plus récemment, la recherche est allée plus loin en investiguant directement la nature du lien entre ces items parafovéaux et le mot fixé. Au service de cette investigation, Dare et Shillcock (2013) ont proposé le réemploi du paradigme de la *Flankers Task* (Eriksen, 1974) en proposant que la décision du sujet s'effectue sur des mots entiers et non plus sur des lettres isolées comme dans le paradigme initial. Cette adaptation de la Flankers Task a disposé des paires de lettres en tant que flankers et a été nommée *Flanking Letter Lexical*



*Decision.* L'étude de Dare et Shillcock (2013) a non seulement fourni de nouveaux résultats intéressants mais elle a eu également le mérite de proposer un paradigme de la reconnaissance du mot permettant de traiter les effets de la parafovéa sur la fovéa. Jusqu'à présent, cette question a principalement été abordée par les études en oculométrie. Grâce à cette adaptation de la Flankers Task en version lexicale, les auteurs ont mis en évidence que le traitement du mot en fovéa dépendait directement des paires de lettres en parafovéa en disposant des flankers autour du mot cible, en condition répétition (ro rock ck) comparativement à une condition contrôle sans recouvrement orthographique avec le mot cible (le rock sh). Les résultats ont révélé également que l'ordre des flankers autour du mot ne jouait aucun rôle, puisque l'inversion des flankers autour du mot cible (ck rock ro) n'impactait pas significativement les temps de réaction. Ces résultats ont été répliqués par Grainger et al. (2014) qui ont fourni un modèle décrivant comment l'intégration spatiale de l'information orthographique s'effectue sur plusieurs mots. Par la suite, un large champ d'étude est venu préciser comment la nature des informations parafovéales pouvait interagir avec le mot central.

La version lexicale de la Flankers Task a été utilisée à de nombreuses reprises dans la littérature en testant les effets des informations phonologiques (Cauchi et al., 2020), morphologiques (Grainger et al., 2021), sémantiques (Snell et al., 2018e), syntaxiques (Declerck et al., 2018) et grammaticales (Vandendaele et al., 2020). Ces recherches ont eu pour objectif de mettre à l'épreuve la première version du modèle de lecture de phrases *OBI-reader* (Snell et al., 2018d). Le cadre théorique de l'intégration spatiale de l'information orthographique (Snell & Grainger, 2019a) a proposé une unification des hypothèses émises à la fois par les études sur la reconnaissance du mot et par les études sur la lecture de phrases.

Nous avons obtenu des preuves récentes que le modèle *OBI-reader* parvient à simuler une large gamme d'effets qui s'observent durant la lecture naturelle et il a également simulé les résultats provenant de tests sur le mot écrit comme les données rapportées par Dare et Shillcock (2013) même si des progrès sont encore nécessaires (Meeter et al., 2020).

Dans une perspective développementale, il y a eu un intérêt croissant pour décrire la nature des traitements effectués sur le mot écrit chez l'enfant (*e.g.*, Ehri, 1992 ; Share, 1995). Récemment, des simulations informatiques se sont attelées à simuler les effets impliqués dans la lecture de phrases chez l'enfant (*e.g.*, Reichle et al., 2013). Les premières études qui ont fourni des éléments de réponse sur le rôle de la fovéa et de la parafovéa dans la lecture chez l'enfant ont d'abord étudié les capacités de traitement à l'intérieur de l'empan perceptif (Rayner et al., 1986). À travers ces études sur l'empan perceptif, on peut se rendre compte que l'empan contient différentes zones de traitements, et que cette partition est observable dès la 2<sup>ème</sup> année d'apprentissage de la lecture et ne cesse de se développer jusqu'à la 6<sup>ème</sup> année (Häikiö et al., 2009). Les recherches qui ont étudié les capacités de traitement en parafovéa chez l'enfant sont peu nombreuses mais elles s'accordent sur l'idée que c'est entre la 2<sup>ème</sup> et la 3<sup>ème</sup> année d'apprentissage de la lecture que le traitement de la parafovéa devient efficace chez l'enfant (*e.g.*, Sperlich et al., 2015 ; Khelifi et al., 2015). Toutefois, les informations en parafovéa ne sont pas traitées par les enfants comme par le lecteur expert, et il semble que ce sont davantage les premières lettres du mot qui font l'objet d'un traitement parafovéal chez l'enfant (Milledge et al., 2021).

L'objectif principal de cette thèse a été de pister les trajectoires développementales des effets de flankers rapportés jusqu'à présent dans les études chez le participant adulte. Pour cela, nous avons testé les effets des flankers sur de grands échantillons d'enfants de la

1<sup>ère</sup> à la 6<sup>ème</sup> année d'apprentissage de la lecture et nous avons comparé nos données à celles obtenues chez des participants adultes. Plus précisément, nous avons testé les effets orthographiques des bigrammes (Grainger et al., 2014), des mots entiers (Snell et al., 2018a), des informations morphologiques (Grainger et al., 2021), et le biais attentionnel vers la droite du mot fixé (Snell & Grainger, 2018). Un objectif complémentaire a été d'apporter des éclaircissements sur la contribution des informations phonologiques dans les effets de relation orthographique observés jusqu'à présent dans les études qui ont utilisé la Flankers Task chez l'adulte. Ce dernier point n'a pas encore fait l'objet d'investigation.

### *Les études de la présente thèse*

Dans l'étude 1, nous avons testé la contribution des informations phonologiques aux effets observés jusqu'à présent dans la Flankers Task auprès de 96 participants adultes à travers deux expériences. L'hypothèse selon laquelle les informations phonologiques peuvent bénéficier aux effets orthographiques n'avait pas encore fait l'objet d'une investigation et demeurait un point important à explorer dans le cadre théorique de l'intégration en parallèle des informations orthographiques au cours du traitement du mot (Snell & Grainger, 2019a). Dans l'expérience 1, nous avons utilisé la Flankers Task en manipulant des informations phonologiques et orthographiques à travers trois conditions. Dans la première condition, les flankers étaient des pseudo-homophones (roze rose roze), dans la deuxième condition orthographique-contrôle (rone rose rone) et dans la troisième condition des pseudo-mots sans rapport avec le mot cible (mirt rose mirt). Dans l'expérience 2, nous avons utilisé une tâche d'amorçage masqué afin de répliquer les résultats standards selon lesquels les amorces reliées phonologiquement au mot cible engendrent des temps de réaction significativement plus rapides pour les amorces pseudo-homophones (voir Perfetti

& Bell, 1991 ; Ferrand & Grainger, 1992). Dans la première condition, les amorces étaient des pseudo-homophones (*roze-rose*), dans la deuxième condition des pseudo-mots contrôles (*rone-rose*) et dans la troisième condition des pseudo-mots sans rapport avec le mot cible (*mirt-rose*). Dans l'expérience 1, les résultats ont montré que les conditions de pseudo-homophones et pseudo-mots contrôles engendraient des réponses plus rapides et plus précises que la condition sans rapport, et les temps de réaction ne différaient pas significativement entre ces deux premières conditions. Dans l'expérience 2, nous avons répliqué les observations de la littérature subséquente. À travers une analyse combinée, l'interaction entre les conditions et le type de tâche était significative. Par conséquent, contrairement à la tâche d'amorçage masqué, dans la Flankers Task, les informations phonologiques ne contribuent pas aux effets de la relation orthographique. L'impact des flankers sur le mot cible semble être principalement déterminé par la relation orthographique entre ces deux éléments.

Dans l'étude 2, l'objectif était d'obtenir des premières données avec la Flankers Task auprès du jeune lecteur. L'enjeu était de savoir si des effets orthographiques pouvaient être observés chez l'enfant et le cas échéant à partir de quelle année d'apprentissage. La littérature sur les effets engendrés par des éléments linguistiques en bordure de vision/parafovéa chez le jeune lecteur a souvent été étudiée sous un spectre déficitaire et peu d'études rendent compte de ces effets chez le normo-lecteur. Selon Khelifi et al. (2017), la reconnaissance d'un mot cible est facilitée par des amorces répétées à partir de la 5<sup>ème</sup> année d'apprentissage. Pour Sperlich et al. (2015), la taille de l'empan perceptif augmente davantage entre la 2<sup>ème</sup> et la 3<sup>ème</sup> année qu'entre la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> année, ce qui laisse supposer que les enfants situés dans cette tranche d'âge pourraient bénéficier de l'information en

parafovéa. Dans cette étude, nous avons testé 113 enfants de la 1<sup>ère</sup> à la 6<sup>ème</sup> année d'apprentissage de la lecture à travers la Flankers Task. Nous leur avons présenté des conditions où les flankers étaient des bigrammes (ro rock ck vs. pa rock th) et des conditions où les flankers étaient des mots entiers (rock rock rock vs. path rock path). Les résultats ont montré que les effets des flankers dans la condition de bigrammes ont permis une reconnaissance du mot significativement plus rapide lorsqu'ils étaient reliés orthographiquement au mot cible, dès la 1<sup>ère</sup> année d'apprentissage de la lecture. De plus, ces effets n'étaient pas modulés par le niveau de lecture. Nous avons conclu que dès la première année d'apprentissage de la lecture, le traitement orthographique peut s'étendre au-delà du mot fixé.

Dans l'étude 3, nous avons étudié les trajectoires développementales des effets de la morphologie transparente en utilisant la Flankers Task auprès de 86 enfants de la 3<sup>ème</sup> à la 5<sup>ème</sup> année d'apprentissage de la lecture répartis dans deux groupes d'âges différents et auprès de 40 adultes. Cette étude s'est appuyée sur les résultats de Grainger et al. (2021) conduite auprès de participants adultes. Les auteurs ont mis en évidence que la relation morphologique entre les flankers et le mot cible facilite la reconnaissance de ce dernier. Chez l'enfant, la littérature utilisant le paradigme d'amorçage masqué a mis en évidence que les enfants accèdent à la décomposition morphologique des mots à partir de la 3<sup>ème</sup> année d'apprentissage (*e.g.*, Beyersmann et al., 2012 ; Dawson et al., 2018), des amorces reliées morphologiquement au mot cible facilitant la reconnaissance de ce dernier par rapport à des amorces morphologiquement erronées. Dans notre étude, nous avons manipulé des racines et dérivés suffixés dans quatre conditions. Dans les conditions contrôles, les flankers et le mot cible étaient des racines répétées (ami ami ami) ou des dérivés répétés (amitié amitié

amitié). Dans les conditions expérimentales, la cible était le radical et les flankers étaient dérivés (amitié ami amitié) ou inversement (ami amitié ami). Dans les conditions non reliées, les flankers étaient remplacés par un mot sans rapport qui était un radical ou sa forme suffixée (sonore ami sonore) ou inversement (son amitié son). Cette étude a répliqué les observations antérieures chez l'adulte montrant que la reconnaissance d'un mot cible suffixé est facilitée par la présence du radical de la cible en parafovéa. En revanche, les résultats n'ont pas mis en évidence d'effets de la morphologie chez l'enfant. Concernant les conditions contrôles répétées, nous avons affiné notre connaissance des effets de relation orthographique en montrant que les items longs (plus de 5 lettres) sont traités à partir de la 4<sup>ème</sup> année d'apprentissage de la lecture. L'étude conclue que le traitement morphologique, dans un contexte impliquant plusieurs mots traités en parallèle, prend plusieurs années à se développer, et que la complexité morphologique (radical vs. dérivé) est un facteur limitatif pour les effets de relation orthographique dans la Flankers Task auprès des apprentis lecteurs.

Dans l'étude 4, nous avons étudié les trajectoires développementales du biais attentionnel pour le flanker situé à droite du mot central qui a été mis en évidence dans une étude chez l'adulte par Snell et Grainger (2018). La Flankers Task a été utilisée auprès de 241 enfants de la 1<sup>ère</sup> à la 5<sup>ème</sup> année d'apprentissage de la lecture répartis dans deux groupes ainsi qu'auprès de 40 participants adultes. Nous avons proposé des conditions où les flankers étaient reliés orthographiquement au mot cible dans lesquelles le mot cible était répété soit à gauche (parc parc #####), soit à droite (##### parc parc), soit des deux côtés (parc parc parc). Dans les conditions non reliées orthographiquement, les flankers étaient remplacés par un mot différent non relié comme "nuit". Nous avons réussi à répliquer un effet de biais

attentionnel pour le flanker situé à droite du mot central. Les résultats ont montré des effets significatifs de la relation orthographique dans les trois conditions de position des flankers entre les trois groupes de participants. L'analyse des effets standardisés a montré que l'impact du flanker de droite a augmenté entre le groupe 1 (grade 1-2) et le groupe 2 (grade 4-5) et est resté stable jusqu'à l'âge adulte. Concernant l'adulte, nous avons répliqué les observations selon lesquelles il existe un biais attentionnel pour le flanker situé à la droite du mot central. Le même schéma a été observé dans la condition où les flankers étaient maintenus des deux côtés, alors que l'impact du flanker de gauche n'a pas varié significativement dans les trois groupes. Ces données nous ont amenés à suggérer que le biais attentionnel pour les mots disposés à droite du mot central chez les adultes est dû à des asymétries attentionnelles qui se développent pendant le processus d'apprentissage de la lecture et non à une spécialisation hémisphérique innée pour la lecture.

### *Organisation de la présente thèse*

Ce présent manuscrit de thèse est composé de huit chapitres. Le premier chapitre présente le premier modèle de l'identification du mot écrit IAM (McClelland & Rumelhart, 1981) et met en perspective la question des sous-représentations dans les modèles de lecture plus récents. Dans un second temps, ce chapitre propose une présentation du modèle *OB1-reader* (Snell et al., 2018d) ainsi qu'une présentation du paradigme de la Flankers Task de Dare et Shillcock (2013). En fin de chapitre, une simulation de la dernière version du modèle *OB1-reader* (Meeter et al., 2020) est présentée. Le deuxième chapitre est consacré à la première publication de cette thèse (Cauchi et al., 2020 ; *Attention, Perception and Psychophysics*) qui traite de la contribution des informations phonologiques dans les effets de flankers. Ce chapitre permet également de mettre en lumière que le paradigme des

flankers permet d'approcher une situation de lecture naturelle (information apportée par les flankers présentés à gauche et à droite de la cible à traiter) contrairement au paradigme d'amorçage masqué où l'information apportée par l'amorce est présentée à la même localisation que la cible. Le troisième chapitre présente le cadrage théorique des études sur l'enfant d'âge scolaire. Dans ce chapitre, une simulation du modèle *E-Z Reader* (Reichle et al., 2013) est brièvement présenté. La fin de chapitre aborde une série de résultats récents concernant la taille de l'empan perceptif et les capacités de traitement en parafovéa chez l'enfant. Le quatrième chapitre est consacré à la seconde publication de cette thèse (Snell et al., 2021 ; *Attention, Perception and Psychophysics*) traitant de l'étendue de l'attention au-delà du mot fixé chez le lecteur débutant. Le cinquième chapitre présente la troisième publication (Cauchi et al., 2022 ; *Journal of Experimental Child Psychology*) s'intéressant aux traitements des informations morphologiques à travers la Flankers Task chez l'enfant et chez l'adulte. Le sixième chapitre propose un travail soumis sur le biais attentionnel pour les informations localisées à droite du mot fixé chez le lecteur débutant et chez l'adulte (Cauchi et al., en révision). Le septième chapitre est consacré à la discussion générale et le huitième et dernier chapitre présente les perspectives de recherches futures, à savoir, mon projet post doctoral.



# Chapitre 1. Cadre théorique

## 1.1 Modèles de la lecture de mots et codage de l'information spatiale et orthographique

Il existe plusieurs classes de modèles cognitifs qui ont tenté de simuler l'activité de lecture, et une revue exhaustive ne peut être fournie ici. Les enjeux de la modélisation des processus cognitifs sont multiples. Ils peuvent être de décrire, d'expliquer, ou de simuler le fonctionnement cognitif<sup>1</sup>. Dans le cadre de cette thèse, nous porterons notre intérêt sur les modèles connexionnistes et computationnels. On constate que la recherche dans ce domaine a progressé selon deux axes relativement indépendants. Un premier axe s'est concentré sur le traitement orthographique en fournissant des explications sur la façon dont s'effectuait le codage de l'identité et de la position des lettres (*e.g.*, Davis, 1999 ; Grainger & van Heuven, 2003 ; McClelland & Rumelhart, 1981 ; Whitney, 2001). Un second axe s'est concentré sur l'étude des mouvements oculaires fournissant des explications sur des phénomènes temporels et spatiaux de bas niveau à partir de la lecture de texte (*e.g.*, Engbert et al., 2005 ; Reichle et al., 1999, 2003 ; Reilly & Radach, 2006). Le modèle *OB1-reader* (Snell et al., 2018d), présenté ci-après, a été une tentative d'unification de ces deux axes de recherche.

Dans cette thèse, nous nous concentrerons sur les fondements théoriques et les conceptions du traitement orthographique et spatial. Cette section présente succinctement les évolutions des systèmes de codage utilisés dans les modèles, qui ont permis les avancées

---

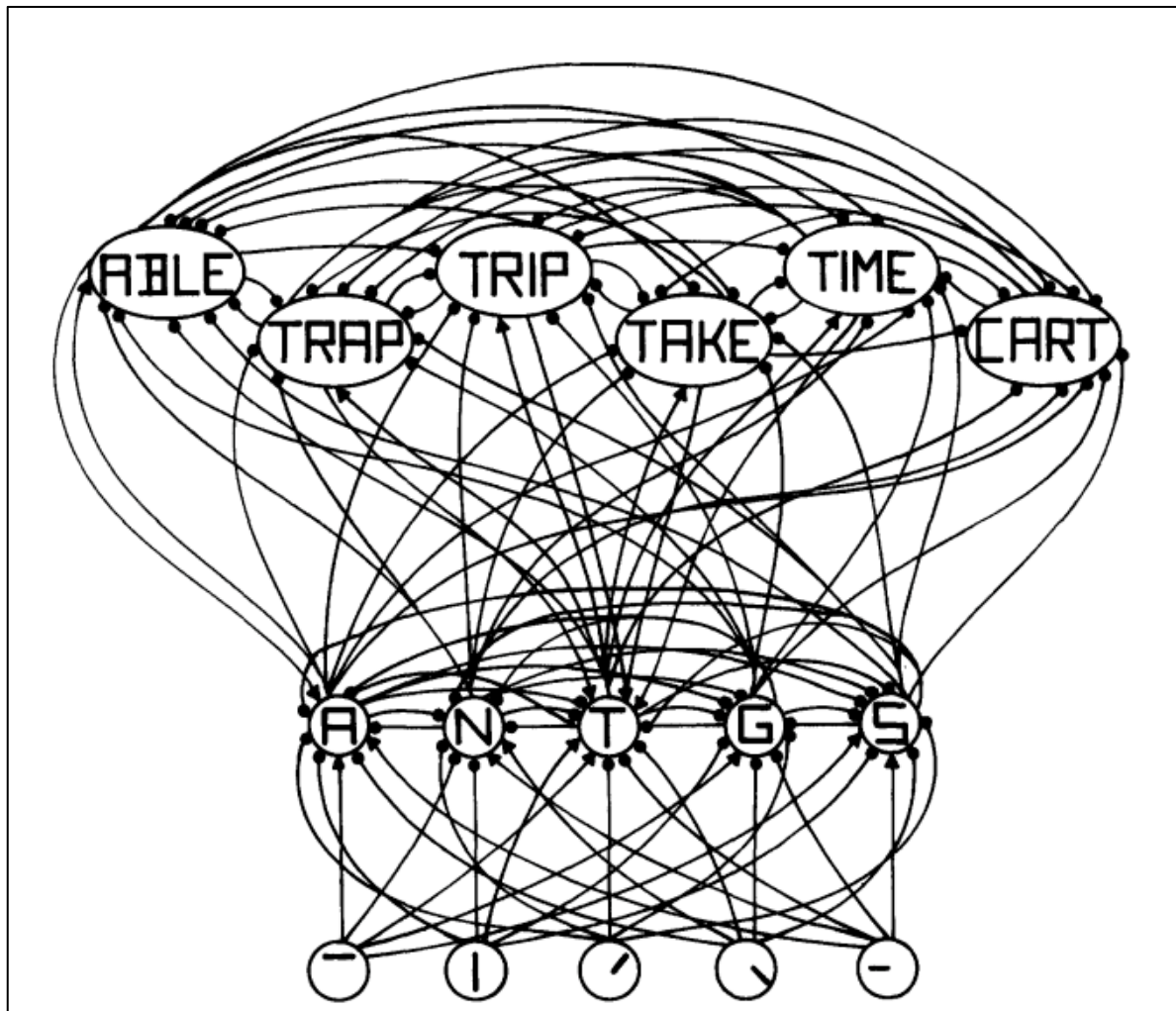
<sup>1</sup> Les enjeux des modélisations des processus cognitifs sont multiples et ne pourraient être énumérés ici de façon exhaustive. On peut évoquer trois points majeurs que sont la nécessité de répondre à des questions de recherche fondamentale, le besoin de répondre à des enjeux sociétaux (*e.g.*, les déficits en lecture) et l'amélioration des procédures informatiques en modélisation pouvant retentir bien au-delà de l'objet d'étude.

que nous connaissons aujourd'hui dans la compréhension des processus d'identification du mot écrit. Elle s'achève par la présentation du modèle *OB1-reader*, revêtant un intérêt crucial pour le présent travail.

### **1.1.1 Les premiers systèmes de codage de l'information orthographique**

Dès le début des années 80, la recherche en lecture s'est appuyée sur le recueil de données empiriques et sur les avancées en informatique pour bâtir ses modèles. Si certains travaux ont pu être dédiés aux traitements phonologiques, morphologiques et sémantiques (*e.g.*, Frost et al., 2005), c'est le traitement orthographique, *i.e.*, le codage de l'identité des lettres à la bonne position dans le mot, qui a très vite été perçu comme étant situé au cœur des processus d'identification du mot. Le modèle à Activation Interactive (*Interactive-Activation Model*, IAM) de McClelland et Rumelhart (1981) a été sans doute le plus repris dans la littérature afin de rendre compte de ces processus. L'architecture de ce modèle comprend trois niveaux : le niveau des traits des lettres, le niveau des lettres et le niveau des mots, chacun constitué d'un ensemble d'unités, ou nœuds, spécifiques reliées entre-elles par des connexions inhibitrices à chaque niveau et par des connexions excitatrices entre les niveaux. Le niveau des mots est constitué d'un ensemble de nœuds de mots et le niveau des lettres est constitué d'un ensemble de nœuds de lettres, un pour chaque lettre à chaque position dans un mot. Le niveau des traits est constitué d'un nœud pour chaque trait de lettre. L'architecture de l'IAM est hiérarchique puisque le niveau des traits ne peut interagir directement avec le niveau des mots sans passer par le niveau des lettres et inversement. Les événements qui suivent la présentation d'un mot dans l'entrée du modèle peuvent être décrits comme suit : une activation est générée dès qu'une chaîne de lettres est présentée dans les entrées visuelles du modèle, le degré d'activation d'un nœud correspond à la force

d'une hypothèse algébrique selon laquelle l'entrée contient bien la chaîne de lettres que le modèle doit identifier. Plus un nœud est actif, plus il est probable que le système signale que l'entrée visuelle contient bien l'unité que le nœud représente. Un nœud dont le niveau d'activation dépasse un certain seuil excite d'autres nœuds avec lesquels il est compatible. Par exemple, la présence de la lettre T en début de mot est compatible avec la présence du mot TABLE ; tous les nœuds non compatibles avec la présence de la lettre T à la première position sont inhibés et tous les autres sont activés (cf. Figure 2). Chaque nœud de mots actif est en concurrence avec tous les autres nœuds de mots et envoie une excitation de rétroaction aux nœuds des lettres pour les lettres qui lui correspondent. Une fois qu'une chaîne de lettres est présentée et que ce processus est mis en œuvre, le processus se poursuit jusqu'à ce qu'un modèle asymptotique soit atteint et que l'entrée soit désactivée (et que l'activation des unités individuelles diminue jusqu'à un état de repos), ou un nouveau stimulus est présenté (souvent un stimulus de masquage), conduisant ainsi le système vers un nouvel état stable et effaçant les traces restantes du stimulus précédent.



**Figure 2.** *Interactive-Activation Model-IAM* (McClelland & Rumelhart, 1981) activation des nœuds pour la lettre T en première position dans un mot.

Ce modèle a été conçu pour rendre compte des données empiriques de l'époque. Le modèle a bien simulé les effets classiques de supériorité mot-lettre *i.e.*, une lettre isolée est moins bien reconnue qu'une lettre dans un mot (*e.g.*, Cattell, 1886 ; Reicher, 1969). Il a également simulé correctement l'observation selon laquelle la reconnaissance d'un mot de basse fréquence est entravée lorsqu'il a au moins un voisin orthographique de haute fréquence qui partage une partie de ses lettres à la bonne position (*e.g.*, flou-bleu ; Grainger et al., 1989 ; Grainger, 1990). Cependant, le codage des chaînes de lettres utilisé par

McClelland et Rumelhart est de type *slot-based* ou basé sur la position absolue. De ce fait, le traitement des lettres s'effectue de manière rigide et s'avère très coûteux. On a constaté que ce type de codage fonctionne bien pour la reconnaissance de mots isolés mais ne convient pas pour la lecture de mots en contexte de phrase du fait qu'un mot avec une certaine lettre à une certaine position n'active que les mots ayant la même lettre à la même position et il était également coûteux de changer l'ensemble de la configuration des activations pour le mot  $n+1$  lors de la fixation du mot  $n$ . Une multitude de preuves empiriques a été obtenue contre ce type de codage en position absolue. Parmi celles-ci, on peut citer les études qui ont utilisé le paradigme *Rapid Parallel Visual Presentation* (RPVP, McClelland & Mozer 1986), et celles qui ont utilisé le paradigme d'amorçage masqué (*e.g.*, Andrews, 1996 ; Perea & Carreiras, 2006 ; Perea & Lupker, 2004). De façon générale, l'ensemble de la recherche sur la reconnaissance du mot écrit s'est positionnée en faveur d'interfaces plus flexibles codant pour la position relative des lettres dans le mot (*e.g.*, Mozer, 1987). On note cependant que le fonctionnement de l'IAM était très élaboré pour l'époque et que ses grands principes ont été repris dans des modèles de lecture plus récents (*e.g.*, Jacobs & Grainger, 1992 ; Coltheart et al., 2001 ; Grainger & van Heuven, 2003). Ce modèle historique de McClelland et Rumelhart a posé des bases solides en modélisation des processus d'identification du mot et les principaux concepts comme le lexique de mot, le niveau des récepteurs de lettres et le fonctionnement en activation / inhibition entre les niveaux (voir Coltheart et al., 2001 pour une analyse plus approfondie).

On peut s'apercevoir que dans l'IAM, le niveau de sous-représentations contient un ensemble de lettres reliées entre elles par des nœuds. Cela permet de révéler un point important en modélisation des phénomènes impliqués dans la lecture. En effet, deux options

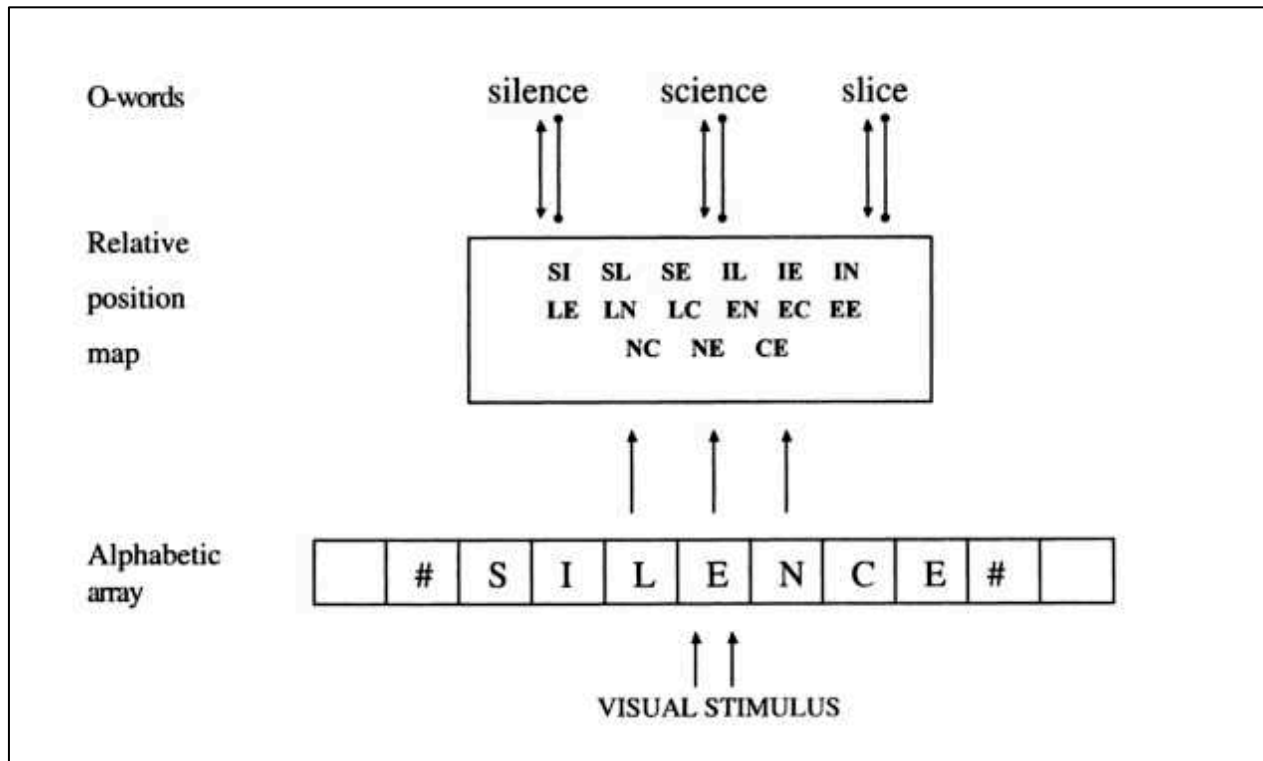
s'offrent au chercheur : 1) laisser le modèle fonctionner en autonomie et étudier à postériori comment il est parvenu aux résultats, 2) régler les paramètres à priori et tenter de simuler des données avec ces paramètres. Comme ces recherches impliquent également de pouvoir rendre compte de la façon dont le modèle est parvenu au résultat, c'est souvent la seconde option qui est choisie par le chercheur. Dans l'IAM, le choix d'une couche intermédiaire de nœuds de lettres a relevé d'un choix des chercheurs à priori, partant du principe que c'est la lettre qui est la plus petite unité pour le codage des mots. Dans la partie qui suit, nous verrons que la nécessité de prendre en compte une plus grande gamme d'effets a impulsé des propositions alternatives quant à la nature de ces sous-représentations dans la couche intermédiaire des modèles.

### **1.1.2 Le niveau des sous-représentations en modélisation**

Il est assez intuitif de penser que pour simuler des effets de bas niveau liés aux contraintes spatiales lors de la reconnaissance du mot écrit, *e.g.*, les effets de migration de lettres (Davis & Bowers, 2004) ou/et les effets des mots environnants (Angele et al., 2013), tout le problème réside au niveau des paramètres de bas niveau du modèle, *i.e.*, les paramètres simulant l'empan perceptif ou les paramètres simulant les composantes attentionnelles. Il est en revanche contre intuitif de penser que pour prendre en compte les processus qui interviennent très tôt dans la reconnaissance du mot, la solution se situe au niveau des sous-représentations lexicales. Pourtant, dans les modélisations qui ont utilisé le codage orthographique et/ou spatial, les évolutions dans la façon d'appréhender ces sous-unités ont fortement contribuées à la prise en compte de données empiriques. Dans cette partie nous abordons deux types de sous-représentations qui ont pu être employées dans le cadre de ces modèles afin de comprendre les enjeux du codage orthographique et spatial.

L'IAM de McClelland et Rumelhart (1981) utilisait des lettres en tant que sous-unités lexicales. Ce choix était basé sur l'idée que la lettre était la plus petite sous-unité du langage écrit et que cela ne pouvait être autrement pour le lecteur qui code de l'information linguistique imprimée. Pour répondre à des problématiques ayant trait à l'efficacité de l'IAM et pour unifier les théories du traitement du mot au niveau auditif et visuel, Seidenberg et McClelland (1989) ont adapté au modèle de lecture le concept *wickelphone* (en allemand empaquetage de phonèmes) de Wickelgren (1969). Cette adaptation a permis de coder la position des phonèmes en utilisant des systèmes de codage en trigrammes ou triplets de lettres. Désormais le modèle sélectionnait le bon mot candidat dans le lexique orthographique non plus en fonction d'une seule lettre mais en fonction d'une configuration particulière de graphèmes et phonèmes. Par exemple, le mot de 6 lettres SPIRIT (123456) était codé comme un ensemble non ordonné de 4 trigrammes : SPI, PIR, IRI, RIT (123, 234, 345, 456) permettant la prise en compte de toutes les lettres en contiguïté dans le mot. Un peu plus tard, le modèle BLIRNET (Mozer, 1987) utilisera également des trigrammes au sein desquels des insertions de lettres pouvaient être effectuées (symbolisé par un caractère de soulignement \_). Par exemple, le codage du mot SPIRIT consistait à ajouter au premier trigramme SPI, les trigrammes ouverts S\_PI et SP\_I et ajouter au second trigramme IRI, les trigrammes ouverts I\_RI et IR\_I (et ainsi de suite pour les autres trigrammes). Les modèles qui ont utilisé les schémas en trigrammes ouverts ont permis de rendre compte des effets de migration de lettre et du contexte local (*e.g.*, Mozer, 1983). Cependant, une configuration donnée de trigrammes a seulement une seule possibilité d'ordre pour un langage donné (*e.g.*, 6 trigrammes pour le mot SPIRIT). Par la suite, ce type de sous-représentations a été

abandonné au profit de sous-représentations considérées comme plus efficaces pour simuler des effets observés dans la littérature à cette époque (voir Ferrand, 2007 pour une revue).



**Figure 3.** Architecture fonctionnelle du Modèle *Parallel Open-Bigram* (Grainger & Van Heuven, 2003) pour la présentation du stimulus "silence" au niveau des détecteurs de lettres.

Les modèles SERIOL (Whitney, 2001) et *Parallel Open-Bigram* (Grainger & Van Heuven, 2003) ont été les premiers modèles à utiliser des paires de lettres ou bigrammes ouverts pour coder la position relative des lettres dans le mot. Dans le cas du modèle *Parallel Open-Bigram* (cf. Figure 3), l'ensemble de bigrammes ouverts constituent le niveau intermédiaire du modèle, situé entre les détecteurs de lettres et le lexique de représentation des mots entiers. La présentation d'un mot dans la première couche (détecteurs de lettres) entraîne une génération de bigrammes à partir des lettres qui composent ce mot dans la couche intermédiaire (ensemble non ordonné de bigrammes). La couche intermédiaire envoie des activations facilitatrices et inhibitrices dans la couche supérieure (lexique



orthographique) afin de sélectionner le bon mot parmi plusieurs candidats. Grâce à ce système de codage en bigrammes ouverts, on peut répliquer les effets d'amorçage de Peresotti et Grainger (1999) où des amorces plus courtes que le mot cible parviennent à amorcer ce mot. Par exemple, l'amorce SLECE (13467) peut amorcer le mot SILENCE (1234567) en activant l'ensemble non ordonné de bigrammes suivants : SL, SE, LE, LC, EC et EE (13, 14, 34, 36, 46 et 47). Plus tard, Grainger et Hannagan (2012) ont apporté des ajustements au modèle qui ont permis notamment de simuler les effets de relations orthographiques rapportés dans d'autres études (*e.g.*, Grainger et al., 2006 ; Van Assche & Grainger, 2006).

Selon Grainger et Ziegler (2011), l'utilisation de ces sous-représentations en bigrammes ouverts a néanmoins des limites. En effet, le schéma en bigrammes ouverts, tel que présenté ici, omet de prendre en compte deux facteurs. Le premier de ces facteurs concerne le fait que la fréquence d'un bigramme détermine la probabilité de reconnaissance du mot traité. Ainsi, un bigramme de faible fréquence comme SH (dans le cas du français) est peu informatif pour la reconnaissance d'un mot. Le système infère que le S est quelque part avant le H sans avoir plus de précisions, ce qui peut engendrer un grand nombre d'erreurs avant que le système puisse identifier le mot SARA H par exemple. Le second facteur concerne le fait que des bigrammes plus fréquents sont générés pour coder des mots mais ces mots sont déjà connus du sujet comme étant soit des mots à part entière (*e.g.*, ME, TE, LA) soit des éléments qui ont été regroupés afin d'optimiser les performances de traitement. Ces constats ont suggéré que les premières étapes du traitement de l'information orthographique devaient être suppléées par deux voies de traitement distinctes dans ce modèle. La formalisation de Grainger et Ziegler (2011) propose la présence de deux voies de traitement

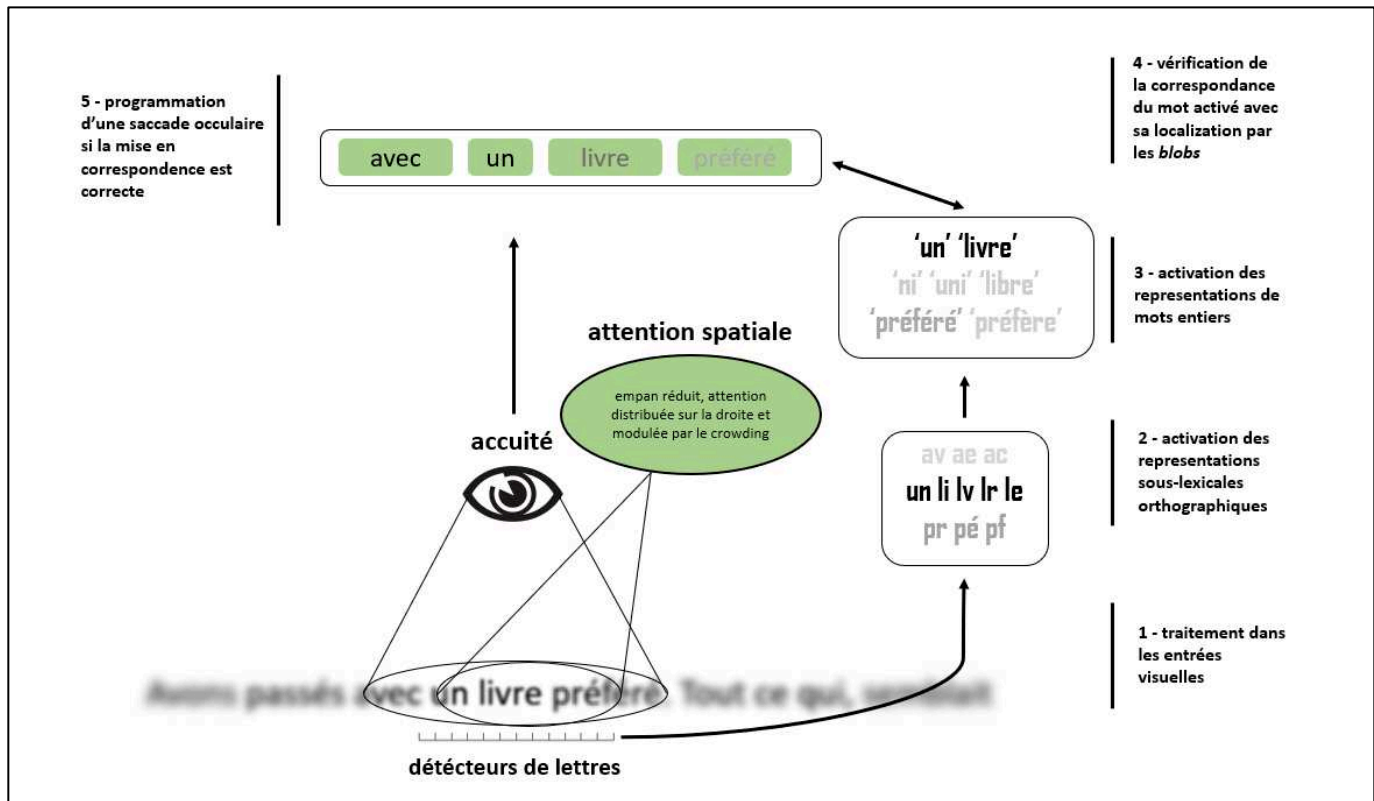
orthographique. Une voie *coarse grained*, ou grain grossier, qui permet de coder les combinaisons de lettres peu informatives en l'absence d'informations précises sur la localisation et une voie *fine grained*, ou grain fin, qui permet de coder les combinaisons fréquentes (graphèmes ou affixes). La première voie de traitement serait sollicitée dans le cas de mots complexes et serait dans une relation unique avec le lexique orthographique. La seconde voie serait en lien avec la boucle phonologique et permettrait le codage rapide des mots fréquents.

Le système de codage en bigrammes ouverts représente cependant une explication plausible de la façon dont l'information orthographique est codée dans le cerveau. Au-delà de ces limites, il faut évoquer les travaux qui ont considéré la nature biologique de ces bigrammes. Par exemple, Binder et al. (2006) ont montré que dans l'aire cérébrale nommée "aire visuelle de la forme des mots", l'activité neuronale était corrélée à la fréquence des bigrammes présents dans les chaînes de lettres présentées aux sujets. Ces preuves ont également étayé un autre modèle inspiré du codage orthographique : le modèle *Local Combination Detector* (LCD) de Dehaene et al. (2005).

### **1.1.3 Le modèle *OB1-reader***

Le modèle *OB1-reader* de Snell et al. (2018d) est un modèle de lecture de texte qui propose une vision intégrative des connaissances issues des recherches sur le traitement du mot et des recherches en mouvements oculaires. Pour ce qui concerne le codage orthographique et spatial, le fonctionnement du modèle est inspiré des conceptualisations précédentes (Grainger et van Heuven, 2003 ; Grainger et al, 2014). Pour ce qui concerne la simulation du traitement du mot et du mouvement des yeux, le modèle a adopté un système

nommé *Parallele Graded* (PG) qui suppose un traitement en parallèle des mots comme certains de ses concurrents (e.g., *SWIFT*, Engbert et al., 2005 ; *Glenmore*, Reilly & Radach, 2006). L'architecture du modèle schématisée en Figure 4 contient cinq composantes clés dont le fonctionnement est brièvement décrit ci-dessous :



**Figure 4.** Architecture schématique du modèle *OB1-reader* (Snell et al., 2018d).

(1) Au niveau du traitement des entrées visuelles *OB1-reader* voit plusieurs mots à la fois (deux mots de chaque côté du mot fixé). Au sein de l'entrée visuelle, le traitement des lettres est modulé par l'acuité visuelle et l'attention spatiale. L'attention est distribuée asymétriquement vers la droite et le centre de l'attention peut se déplacer indépendamment de la fixation du regard.

(2) Au niveau de l'activation des représentations sous-lexicales, les nœuds de bigrammes ouverts sont activés par l'entrée visuelle, avec une activation plus forte pour les lettres proches des centres de fixation et d'attention, et avec une activation plus faible des lettres éloignées du centre de l'attention. Les bigrammes sont codés en fonction de la même façon que le schéma présenté dans la section précédente dans le modèle *Parallel Open-Bigram* (Grainger & Van Heuven, 2003).

(3) Au niveau de l'activation des représentations lexicales de mots entiers, les nœuds de mot sont activés par des nœuds codant pour les bigrammes ouverts qui apparaissent dans le mot. Les nœuds de mots sont inhibés par les nœuds de mots qui partagent les mêmes bigrammes.

(4) Lors de la fixation d'un texte, le modèle génère une représentation spatio-topique à l'aide de *blobs* au niveau de la phrase qui représente les attentes concernant la longueur des mots individuels. Les *blobs* sont des sur-représentations visuelles et non-linguistiques qui récupère les emplacements ordonnés des mots dans la phrase selon leur longueur approximative. Les nœuds de mots qui atteignent un certain seuil de reconnaissance sont mis en correspondance avec les *blobs* dans le système de représentation spatio-topique. Le modèle ne reconnaît un mot que lorsqu'il peut être cartographié sur un emplacement plausible. Les mots reconnus génèrent des attentes concernant les mots à venir, grâce à l'activation par rétroaction des nœuds de mots. Lorsqu'un mot est reconnu avec succès, l'attention se déplace vers l'endroit le plus saillant. La saillance de chaque mot est déterminée par la proximité de ses lettres avec les centres de fixation et d'attention.

(5) Le lancement de la programmation d'une saccade est déterminé de manière stochastique toutes les 25 ms, la reconnaissance de mots réussie augmente les chances d'initiation de saccade. Le centre du mot le plus saillant dans l'entrée visuelle devient la cible de la saccade. Le ciblage de la saccade est basé sur la saillance et est annulé lorsqu'un emplacement de mot à gauche de la fixation n'a pas encore été reconnu. Dans ce cas, une régression vers cet emplacement sera exécutée. Le gradient attentionnel s'élargit après chaque fixation au cours de laquelle un mot est reconnu avec succès, et il se rétrécit après chaque fixation qui ne conduit pas à une reconnaissance réussie.

Dans l'étude de Snell et al. (2018d), le modèle a été évalué en deux phases à partir du corpus de phrases *Potsdam sentence corpora*, PSC (Laubrock & Kliegl, 2018). La première phase a consisté à répliquer des données de mouvements oculaires à partir de l'étude de Stede et Neumann (2014). La deuxième phase a consisté à simuler les résultats de l'expérience de Dare et Shillcock (2013) qui a utilisé le paradigme de la frontière visuelle. Les résultats de cette simulation ont montré que le modèle a répliqué l'ensemble de ces données<sup>2</sup>. Dans la première simulation, le modèle *OB1-reader* a répliqué une large variété de phénomènes de lecture de texte, tels que les refixations, les régressions, les sauts de mots et les effets de prévisualisation parafovéale. D'un point de vue quantitatif, le modèle a produit des durées de fixation selon la longueur des mots, des effets de fréquence et de prévisibilité et des positions d'atterrissage du regard similaires aux données obtenues en situation expérimentale. Les résultats de la seconde simulation ont été tout aussi probants puisque le

---

<sup>2</sup> On peut noter deux principaux points qui n'ont pas été répliqués par *OB1-reader*. Dans la première simulation cela a concerné les effets de retard lexicaux et les effets des mots qui suivent le mot fixé (*e.g.*, Kennedy & Pynte, 2005). Et dans la seconde simulation la difficulté était plus de nature quantitative que qualitative puisqu'il s'agissait d'une différence de 12 ms entre la simulation et l'étude princeps de Dare et Shillcock (2013) pour ce qui concernait les temps de fixation entre la condition répétition et la condition contrôle.

modèle est parvenu à répliquer des durées de fixation similaires à celles de l'étude contrôle de Dare et Shillcock (2013) où le patron de résultat décrivait des durées de fixation plus courtes sur le mot cible  $n$  lorsqu'elle était répétée en position  $n+1$ , par rapport à la condition où le mot  $n+1$  était un mot non relié orthographiquement.

L'originalité du modèle *OB1-reader* est de proposer un cadre qui intègre à la fois les recherches sur la reconnaissance du mot et celles sur les mouvements oculaires durant la lecture de texte. En adoptant l'approche de codage en position relative des lettres pour la reconnaissance des mots, *OB1* dispose d'un moyen simple et clair pour coder la position des lettres sur plusieurs mots en parallèle. Le modèle rend compte non seulement des effets "classiques" de bas niveau mais également des effets de la parafovéa sur la fovéa tels que rapportés dans la littérature (Angele et al., 2013 ; Dare & Shillcock, 2013 ; Grainger et al., 2014 ; Snell, Vitu et al., 2017). Mais la principale avancée théorique de ce modèle est son utilisation d'une représentation spatio-topique au niveau de la phrase. En effet, durant la lecture d'une phrase, l'entrée visuelle établit une représentation spatio-topique du nombre de mots et de leur longueur approximative à partir des *blobs*. Lorsque les nœuds de mots sont activés, un processus de mise en correspondance attribue des identités de mots aux *blobs* qui correspondent en longueur. La formalisation de ces représentations constitue un apport notable dans les modèles de la lecture de texte. Cela répond aux interrogations sur la façon dont un système de traitement parallèle peut identifier plusieurs mots sans perdre la configuration générale des mots adjacents au mot fixé.

Les auteurs notent principalement trois limites à ce modèle : 1) la difficulté à considérer les petits mots constitués de deux lettres ; 2) la difficulté à capturer les effets de lags lexicaux et du mot suivant mis en évidence dans la littérature (Kennedy & Pynte, 2005) ;

3) dans l'implémentation, la dynamique de la largeur du gradient attentionnel n'est utilisée que pour permettre au modèle de trouver une taille de fenêtre attentionnelle optimale et adaptée à l'entrée qu'il reçoit. Or on sait que ce facteur relève également de la façon dont est répartie l'attention dans l'empan perceptif, et que ce facteur est lui-même lié à l'expertise en lecture. Des travaux supplémentaires seront donc nécessaires pour apporter des solutions à ces faiblesses.

Après avoir abordé des points de théorie généraux, ce travail se concentre sur le *flankers effect* qui a posé des questions complexes aux recherches sur la reconnaissance du mot. Cet effet a été mis en évidence en utilisant le paradigme de la Flankers Task qui teste les effets d'unités linguistiques environnants le mot fixé. Dans la partie qui suit, nous présentons le paradigme de la Flankers Task et l'expérience 1 de l'étude princeps de Dare et Shillcock (2013) dans laquelle le paradigme a été réadapté. Nous présentons l'étude de Grainger et al. (2014) dans laquelle les effets ont été répliqués et où une explication de ces effets a été proposée. Cette partie s'achève sur une simulation de ces effets par le modèle *OB1-reader*.

## **1.2 Le paradigme Flankers Task**

### **1.2.1 Un bref historique de la Flankers Task**

Le paradigme Flankers Task a été introduit par Eriksen (1974) dans le but d'étudier les processus attentionnels impliqués dans l'identification d'une cible en présence de distracteurs. Le travail princeps d'Eriksen a eu pour principal objectif de tester les capacités de traitement des lettres en vision centrale chez des participants adultes en disposant d'autres lettres en vision périphérique. Les lettres ont été sélectionnées sur la base de leurs

traits visuels<sup>3</sup> et ont été regroupées en deux binômes : les lettres H et K versus les lettres S et C. Le caractère innovant de ce paradigme résidait dans l’affichage des stimuli. En effet, différemment des tâches de reconnaissance de lettres isolées qui étaient jusqu’ici assez répandues, cette tâche présentait une lettre en zone centrale (fovéa) entourée de trois lettres de part et d’autre (parafovéa) séparées par un espace. Le principe de la manipulation expérimentale était de faire varier la nature des flankers / distracteurs afin de mesurer l’impact sur la réponse du sujet. Parmi les six conditions utilisées dans l’étude d’Eriksen, on trouve une condition similitude où les flankers sont des répliques de la lettre cible (H H H H H H H), une condition compatible où les flankers sont des lettres partageant des caractéristiques visuelles compatibles avec la lettre cible (K K K H K K K), et une condition incompatible où les flankers sont des lettres ne partageant pas de caractéristiques visuelles avec la lettre cible (S S S H S S S). Les stimuli étaient affichés durant 1 seconde et les participants disposaient d’un levier à droite et d’un levier à gauche et devaient indiquer quelle lettre ils avaient perçu à l’intérieur d’un tachistoscope en tirant sur l’un des leviers le plus rapidement possible. Les principaux résultats de cette étude ont révélé que les temps de réaction pour les conditions de similarité et de compatibilité étaient identiques et significativement plus courts que pour la condition incompatible. Dans ce cadre, l’identification de la cible ne dépendait pas directement de la nature de la lettre cible mais était avant tout fonction de la relation entre les lettres flankers et la lettre cible. L’effet de flanker ou *flanker effect* à l’œuvre dans cette tâche relève, selon Eriksen, d’un processus attentionnel de bas niveau dépourvu d’inhibition pour les éléments disposés autour de la

---

<sup>3</sup> Dans le travail princeps d’Eriksen (1974), les caractéristiques des traits visuels des lettres utilisées en tant que stimuli étaient basées sur le système de Gibson qui comprenait cinq dimensions : courbure, intersection, redondance, discontinuité et orientation.



cible, conduisant à favoriser ou à entraver sa reconnaissance. À partir de cette hypothèse, Eriksen (1974) conclut que le processus de traitement de la cible s'effectue avec l'impossibilité de négliger les flankers et relève de ce fait d'un traitement parallèle de l'ensemble des stimuli. La Flankers Task, telle que décrite ici, a posé les bases du *flanker effect* et donnera suite à un grand nombre de manipulations expérimentales. En effet, le paradigme a rencontré un certain succès et d'autres variantes notables ont utilisé des chiffres (*e.g.*, Lindgren et al., 1996), des pastilles de couleurs (*e.g.*, Rafal et al., 1996), ou des chevrons directionnels en tant que stimuli (*e.g.*, van Veen et al., 2001 ; Bunge et al., 2002 ; Fassbender et al., 2006 ; Mennes et al., 2011). Mais la version du paradigme la plus pertinente pour cette présente thèse est celle qui a été utilisée par Dare et Shillcock (2013) qui ont manipulé des paires de lettres en tant que flankers et des mots en tant que cible. Ce travail est présenté dans la partie qui suit.

### **1.2.2 L'étude de Dare et Shillcock (2013)**

L'étude de Dare et Shillcock (2013) avait initialement pour but d'apporter des éléments de réponse au débat entre les conceptions sérielles et parallèles en modélisation de l'identification du mot écrit. Dans cette optique, les auteurs ont implémenté la Flankers Task dans une tâche de décision lexicale nommée *Flanking Letter Lexical Decision* (FLLD) utilisant des mots et des non-mots cibles et des paires de lettres en tant que flankers séparées de la cible par un espace (*e.g.*, ro rock ck). La procédure consistait à présenter les stimuli sur un écran d'ordinateur durant 150 ms<sup>4</sup> et à recueillir la réponse des participants (mot / non-mot)

---

<sup>4</sup> Le temps d'affichage des stimuli fixé à 150 ms retenu par Dare & Shillcock (2013) remplissait principalement deux fonctions : 1) cela limite la reconnaissance du mot à des bas niveaux de traitement visuel / orthographique, 2) cela prémunit de possible glissements du regard en dehors de la zone fovéale.

par le biais de deux touches sur un clavier. La manipulation expérimentale comprenait trois conditions d'affichage dans lesquelles étaient disposées des paires de lettres de part et d'autre d'un mot cible séparées par un espace. Dans la condition adjacente, la paire de lettre située à gauche du mot central répétait ses deux premières lettres et la paire de lettre située à droite du mot central répétait ses deux dernières lettres (ro rock ck). Dans la condition inversée, les paires de lettres étaient présentées selon un ordre inversé par rapport à la condition adjacente (ck rock ro) et, dans la condition non reliée, les paires de lettres n'avaient aucune relation avec le mot cible (le rocksh). Les résultats de cette étude ont mis en évidence des temps de réaction plus courts pour les conditions adjacente et inversée par rapport à la condition non reliée, ce qui suggère que la relation orthographique entre les flankers et le mot cible a favorisé la reconnaissance de ce dernier. Ce *flanker effect* de nature orthographique était totalement en accord avec les études antérieures d'amorçage qui avaient montré que la relation orthographique entre des amorces et une cible fovéale et parafovéale favorisaient la reconnaissance de la cible (e.g., Forster & Davis, 1984 ; Forster, Davis, Schoknecht, & Carter, 1987 ; Grainger & Jacobs, 1993 ; Forster, 1999). Cependant, à la différence des tâches d'amorçage qui répartissent amorces et cible dans le temps et non dans l'espace, dans la tâche FLLD les amorces et la cible sont réparties dans l'espace et non dans le temps. C'est la disposition particulière des stimuli alignés, séparés par un espace et affichés en même temps qui permet de tester les effets qui se jouent au cours de l'intégration spatiale. Les données de Dare et Shillcock (2013) mettent en évidence que les participants ont inévitablement eu recours aux informations disposées en parafovéa afin de catégoriser le mot central. Les auteurs ont conclu que le traitement qui est à l'œuvre dans cette tâche s'étend au-delà de l'unique mot fixé. Ce constat était en accord avec les approches de

traitement en parallèle de l'information orthographique durant la lecture (*e.g.*, Kennedy & Pynte, 2005 ; Vitu et al., 2004). Toutefois, un autre point a attiré fortement l'attention des auteurs dans les données de leur étude. Il s'agit de l'absence de différence significative entre les conditions adjacente et inversé. Le processus d'identification du mot semble s'être déroulé de façon similaire entre ces deux conditions, bien que la disposition des bigrammes autour du mot central était inversée. Ces données contre-intuitives ont suscité des interrogations sur la nature des processus mis en œuvre durant le traitement des stimuli dans cette tâche. Nous verrons que cet effet contre-intuitif a représenté un point important dans les recherches sur le traitement du mot écrit parce qu'il a favorisé les conceptions d'une intégration spatiale de l'information orthographique qui s'effectue en parallèle dans la lecture de plusieurs mots (voir Snell & Grainger, 2019a).

### **1.2.3 Un effet contre intuitif**

Les résultats de Dare et Shillcock (2013) présentent un schéma surprenant dont l'investigation peut fournir des informations capitales dans les recherches sur l'intégration spatiale de l'information orthographique. Le constat était que les temps de réaction ne différaient pas significativement entre les conditions adjacente et inversée, avec un effet net proche de la milliseconde entre ces deux conditions. Ce résultat indiquait que l'ordre des flankers autour du mot cible ne modifiait pas le coût cognitif de sa reconnaissance. Autrement dit, le processus d'identification du mot qui est à l'œuvre dans cette tâche semble s'être déroulé de façon similaire entre ces deux conditions, bien que la disposition des bigrammes autour du mot central était inversée. Le travail de Grainger et al. (2014) a apporté une explication à cet effet grâce à une simple extension du modèle *Bag of Bigrams* de Grainger et van Heuven (2003). Le modèle a été adapté de sorte que le traitement de l'identité et de la

position des lettres soit effectué en parallèle sur plusieurs mots, et que cette information active un ensemble non ordonné de bigrammes ouverts. Selon les auteurs, au cours de l’affichage du stimulus, les paires de lettres présentées en parafovéa génèrent des activations au niveau des représentations sous-lexicales en bigrammes ouverts, et cela indépendamment du fait que les paires de lettres apparaissent sur la gauche ou sur la droite du mot cible. Partant de cela, la reconnaissance du mot cible en fovéa ne peut être entravée puisque les paires de lettres en parafovéa sont similaires aux paires de lettres constitutives du mot fixé. Dans ce cadre, la reconnaissance du mot s’effectue de la même façon dans la condition adjacente et dans la condition inversée. Dans l’étude de Grainger et al. (2014), la manipulation expérimentale comprenait un total de cinq conditions. Les trois conditions princeps de l’étude de Dare et Shillcock ont été conservées, c’est à dire les conditions adjacente, inversée et non reliée dans lesquelles les paires de lettres étaient présentées soit dans l’ordre autour du mot cible (ro rock ck) soit dans l’ordre inverse (ck rock ro), soit n’avaient pas de relation avec le mot cible (le rocksh). Les auteurs ont ajouté deux conditions dans lesquelles les lettres étaient inversées à l’intérieur des bigrammes, en suivant l’ordre d’apparition dans le mot (or rock kc) et dans l’ordre inverse (kc rock or). Outre le fait que l’étude a parfaitement répliqué l’absence de l’effet de l’ordre des bigrammes, un autre résultat intéressant a été mis en évidence : l’ordre des lettres à l’intérieur des bigrammes joue un rôle crucial dans la reconnaissance du mot cible. En effet, les deux conditions ajoutées dans cette manipulation expérimentale ont engendré des temps de réaction significativement plus longs que les conditions adjacente et inversé, venant confirmer l’idée que le traitement de la cible a été entravé par l’inversion de l’ordre des lettres au sein des bigrammes flankers. Ce second résultat était également en accord avec les prédictions du

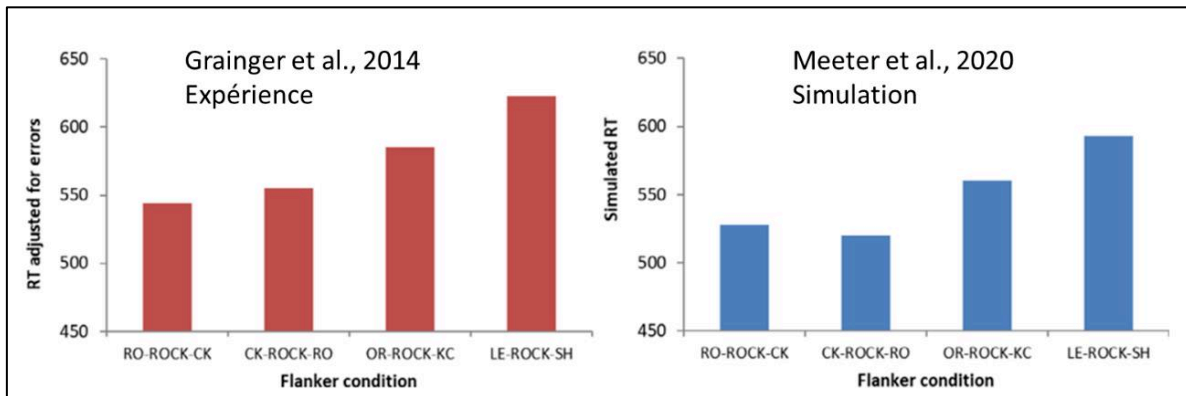
modèle. Selon les auteurs, au cours de l'intégration simultanée des stimuli, l'inversion des lettres dans les bigrammes en parafovéa ne permet pas de sélectionner toutes les représentations sous-lexicales correspondant au mot cible. Les bigrammes inversés activent d'autres combinaisons de bigrammes rendant ainsi la sélection du bon mot candidat moins aisée par rapport aux conditions princeps de l'étude de Dare et Shillcock dans lesquelles l'ordre des lettres à l'intérieur des bigrammes est maintenu intact. De plus, comme prédit par le modèle, les conditions de lettres inversées ont permis une meilleure reconnaissance du mot par rapport à la condition non reliée dans laquelle les bigrammes, et donc les représentations sous-lexicales, sont sans rapport avec le mot cible. Au final, le travail de Grainger et al. (2014) a souligné à la fois l'importance d'un système de traitement en parallèle des mots pendant la lecture et l'importance du recours aux bigrammes ouverts dans les modèles de traitement du mot. De façon annexe, ces observations ont amplifié la validité scientifique des modèles de lecture utilisant des systèmes de codage basés sur la position relative des lettres dans le mot comme proposé par Mozer (1987). L'absence d'effet de l'ordre des bigrammes autour du mot cible a apporté une preuve supplémentaire en faveur de l'utilisation des bigrammes plus que des lettres en tant que représentations sous-lexicales dans les processus de codage de l'information orthographique comme supposé dans les modélisations récentes de l'identification du mot (*Open Bigrams Model*, Grainger et al., 2006 ; *SERIOI*, Whitney, 2001 ; *LCD*, Dehaene et al., 2005). Cette découverte est particulièrement difficile à concilier avec les conceptions sérielles du traitement des mots pendant la lecture (*e.g.*, Angele et al., 2013) compte tenu des effets orthographiques de la parafovéa sur la fovéa, qui attribuent un rôle clé aux détecteurs de bas niveau, et qui ne prédisent aucun effet de l'ordre des lettres à l'intérieur des flankers.

L'étude de Grainger et al. (2014) présentée dans cette section a parfaitement rendu compte des résultats de Dare et Shillcock (2013) et notamment de l'effet contre-intuitif de l'ordre des bigrammes autour du mot cible. La question qui s'est posé par la suite a été de savoir si les explications fournies par Grainger et al. (2014), et qui ont emprunté une voie strictement descriptive, seraient viables dans le cadre de simulations computationnelles du modèle. Ce travail a été effectué par Meeter et al. (2020) en utilisant une variante du modèle *OB1-reader* de Snell et al. (2018d) afin de répliquer l'ensemble des résultats présentés plus haut.

#### **1.2.4 Une simulation de l'effet flankers par le modèle *OB1-reader***

L'étude de Meeter et al. (2020) a testé une variante du modèle *OB1-reader* (Snell et al., 2018d) afin de montrer comment les informations orthographiques peuvent être traitées en parallèle sur plusieurs mots, et de mettre en perspective le rôle particulier de l'attention spatiale dans un tel traitement. Un second enjeu était de montrer comment un modèle de lecture de phrase peut simuler des effets obtenus à partir de tâche à affichages fixes qui n'impliquent pas de déplacement des yeux pour traiter une cible centrale et des stimuli adjacents comme dans la Flankers Task introduite par Dare et Shillcock (2013). La simulation qui a été faite dans ce travail a utilisé l'ensemble des conditions d'affichage qui ont été testées par Grainger et al. (2014) à travers le paradigme *Flanking Letter Lexical Decision*. Les simulations ont montré que le modèle reproduisait l'ensemble des résultats obtenus empiriquement dans l'étude princeps (voir Figure 5). La reconnaissance des mots était plus rapide lorsque les flankers étaient des bigrammes adjacents (ro rock ck) ou inversés (ck rock ro), et était plus lente lorsque les flankers étaient des bigrammes différents (le rock sh). Le bénéfice était fortement réduit lorsque l'ordre des lettres dans les bigrammes était inversé

(or rock kc ou kc rock or), ces deux conditions étant équivalentes. Au niveau inférentiel, les résultats ont été parfaitement répliqués.



**Figure 5.** Temps de réaction des participants (Grainger et al., 2014), et temps de réaction simulé par *OB1-reader* (Meeter et al., 2020) dans le paradigme FLLD.

Quels sont les paramètres essentiels qui ont permis au modèle de répliquer ces effets ?

Pour répondre, il est important d'évoquer que la solution a initialement été proposée dans le modèle *Bag of Bigrams* de Grainger et al. (2014). Le principe de générations de bigrammes ouverts proposé par les auteurs, tenait compte des espaces entre les mots. Ce point était important car il a permis d'éviter la génération de sous représentations illusoires entre les mots, *i.e.*, des bigrammes générés à partir d'un mot fixé et d'un mot adjacent. Dans l'exemple du stimulus "read this", la prise en compte des espaces entre les mots a permis d'éviter la génération de sous-représentations illusoires "rt" et "rh" qui n'appartiennent à aucun mot et qui aurait compliqué la sélection du bon mot candidat. Le principe de générations désordonnées de bigrammes ouverts fonctionnait bien dans le cadre d'un modèle informel mais, pour simuler les résultats obtenus par Grainger et al. (2014), il fallait également postuler l'existence d'un code qui permettait d'établir une frontière entre les mots et ainsi de relier mot cible et flankers à un emplacement donné. La solution a résidé dans l'adoption d'un système engendrant des attentes descendantes directement inférées à partir du stimulus

dans le but de guider la reconnaissance des mots. Ce système était déjà nécessaire dans les simulations de lecture de phrases présentées dans la précédente version du modèle (Snell et al., 2018d) qui avait proposé l'existence d'un processus qui évalue la taille des mots et leurs localisations dans la phrase et qui les compare avec la taille du mot présenté en entrée. La représentation de ces mots a initialement la forme de *blobs* (taches en français) qui codent pour les emplacements des mots dans la phrase. Ces *blobs* permettent au modèle de générer des attentes concernant la longueur de chaque mot dans la phrase. Les nœuds de mots qui atteignent un seuil de reconnaissance sont mis en correspondance avec les *blobs* et, si la longueur approximative entre ces mots coïncide, l'emplacement de ce mot dans la phrase est validé. Autrement dit, les *blobs* permettent une cartographie de la phrase à un niveau spatio-topique et on peut les assimiler à des sur-représentations. Grâce à ces *blobs*, l'entrée visuelle établit une image de la phrase et parvient à établir une connexion spatio-topique entre toutes les entrées lexicales.

Un autre point a concerné le fait que dans la tâche, les affichages fixes n'impliquent pas de déplacement des yeux pour traiter une cible centrale et des stimuli adjacents. Ce point a représenté une difficulté sur le plan conceptuel. Afin de tenir compte de ce paramètre, les auteurs ont fait des ajustements pour que des focalisations étroites et larges du module attentionnel soient rendues possibles. On note que cet ajustement n'a pas eu d'incidence sur les résultats globaux. Il était censé traiter de la façon la plus précise possible, la question de la fluctuation du niveau attentionnel au fil de la tâche. Ces deux types de focalisation étroite et large de l'attention étaient en accord avec l'idée selon laquelle les focales attentionnelles ne sont pas continues durant la Flankers Task. Le principe de ce paramètre est le suivant : durant les simulations, le centre de l'attention est fixé au début de chaque essai de manière à



englober un espace dans lequel le mot cible apparaît. Une focalisation étroite est enclenchée si le mot a une longueur fixe et est toujours présenté au même endroit. Une focalisation plus large est enclenchée si le mot n'apparaît pas dans le champ visuel, ou s'il est trop long ou trop court. Les auteurs ont supposé que les apparitions visuelles entraînent des déplacements exogènes de l'attention vers la localisation de l'apparition du stimulus (*e.g.*, Irwin et al., 2000 ; Theeuwes, 1991), et entraînent une saccade subséquente s'il n'y a plus d'apparition visuelle. Dans le cadre de la Flankers Task, le stimulus était affiché à la même localisation mais les temps d'inactivité durant la tâche (phase de blanc) ont nécessité d'employer ce système afin de redéfinir un niveau d'attention pour chaque présentation.

Ces deux systèmes sont donc essentiels au succès du modèle *OB1-reader* dans la prise en compte des résultats de Grainger et al. (2014). Premièrement, les *blobs* permettent au modèle d'établir une frontière entre les mots et de relier le mot cible et les flankers à un emplacement donné. Deuxièmement, une implémentation de la fluctuation de l'attention visuelle permet au modèle d'activer le bon candidat lors de l'entrée d'un mot. Ces deux systèmes permettent au modèle de tenir compte de ces résultats qui sembleraient déroutants. La reconnaissance de mots basée sur le codage relatif de l'identité et de la position des lettres, tel qu'implémenté dans le modèle en bigrammes ouverts Grainger et van Heuven (2003), lui permet d'intégrer naturellement les informations orthographiques des flankers spatialement déconnectés du mot cible, puisque les bigrammes contribuent à la reconnaissance des mots indépendamment de leur emplacement.

## Chapitre 2 – Etude 1 : Analyses des contributions

### orthographiques et phonologiques au *flanker effects*

#### 2.1 Positionnement théorique

L'étude 1 a abordé la question de la contribution des informations phonologiques au *flanker effect* relativement aux informations orthographiques, contribution déjà validée par (Grainger et al., 2014 ; Snell et al., 2018b). Les études qui ont utilisé le paradigme d'amorçage masqué ont apporté les preuves d'une intervention précoce des informations phonologiques dans le traitement du mot écrit (Perfetti & Bell, 1991). Plus précisément, l'étude de Ferrand et Grainger (1992) a montré que des amorces pseudo-homophone (*roze-rose*) améliorent significativement la reconnaissance de mots cibles par rapport à des amorces contrôle-orthographique (*rone-rose*). La durée d'affichage de l'amorce joue un rôle crucial dans ce résultat : les amorces reliées phonologiquement au mot cible accélère sa reconnaissance seulement lorsque la durée de l'amorçage est fixée à 64 ms, un amorçage de 32 ms ne produisant aucun effet. L'interprétation proposée était que les informations phonologiques interviennent, certes dans un temps très court, mais qu'une certaine durée ( $\approx 60$  ms) est nécessaire pour que la conversion graphème-phonème puisse être effectuée sur les amorces et soit bénéfique à la reconnaissance de la cible. De plus, selon Grainger et Ziegler (2011), les représentations orthographiques sont stockées de façon désordonnées dans un réservoir de représentations et sont activées par un double canal dédié uniquement au traitement des informations orthographiques. Pour les auteurs, l'encodage des informations phonologiques intervenant à partir du mot écrit nécessite des informations plus précises sur la position des

lettres dans le mot et entre les mots pour que de telles informations puissent intervenir à ce bas niveau de traitement (voir aussi Grainger et al., 2016).

À ce jour, aucune manipulation utilisant la flankers task n'a encore été proposée pour tester les effets de la relation phonologique entre les flankers et le mot cible. Une telle manipulation est susceptible d'apporter des précisions sur la possible contribution des informations phonologiques dans les effets de relation orthographique observés jusqu'à présent dans la Flankers Task. On sait que dans les langues écrites utilisant l'alphabet Latin, l'orthographe est systématiquement confondue avec la phonologie, de sorte que les effets d'amorçage spatial observés dans la flankers task pourraient être interprétés comme étant causés par un chevauchement phonologique entre la cible et les flankers.

Dans le cadre de cette étude, nous avons donc examiné les effets de l'intégration temporelle et spatiale des informations orthographiques et phonologiques à travers deux expériences. Dans la première expérience, nous avons utilisé la Flankers Task en manipulant des informations phonologiques et orthographiques à travers trois conditions. Dans la première condition, les flankers étaient des pseudo-homophones (roze rose roze), dans la deuxième condition des pseudo-mots contrôles (rone rose rone) et dans la troisième condition des pseudo-mots sans rapport avec le mot cible (mirt rose mirt). Dans la deuxième expérience, nous avons utilisé une tâche d'amorçage masqué avec le même matériel que celui utilisé dans la première expérience et dans les mêmes conditions expérimentales. Avec la tâche d'amorçage masqué, nous nous attendions à répliquer les résultats standards selon lesquels les amorces pseudo-homophones engendrent des temps de réaction significativement plus rapides que les amorces contrôle-orthographique et les amorces sans rapport. Avec la Flankers Task, nous avons prédit que des flankers répartis autour du mot

cible et séparés d'un espace de ce dernier, ne permettraient pas d'augmenter la rapidité de la reconnaissance du mot cible au-delà du niveau orthographique. L'étude publiée dans *Attention, Perception, & Psychophysics*, est présentée dans la partie qui suit.

## **2.2 Orthographic and phonological contributions to flankers effects**

Christophe Cauchi, Bernard Lété & Jonathan Grainger

*Attention, Perception, & Psychophysics*, 2020, Volume 7 :82, Pages 3571-3580

Copyright : The Author(s) 2020

<https://doi.org/10.3758/s13414-020-02023-0>

Soumis le 7 janvier 2019 ; Accepté le 4 avril 2020

## **Abstract**

Does phonology contribute to effects of orthographically related flankers in the flankers task? In order to answer this question, we implemented the flanker equivalent of a pseudohomophone priming manipulation that has been widely used to demonstrate automatic phonological processing during visual word recognition. In Experiment 1, central target words were flanked on each side by either a pseudohomophone of the target (*e.g.*, *roze rose roze*), an orthographic control pseudoword (*rone rose rone*), or an unrelated pseudoword (*mirt rose mirt*). Both the pseudohomophone and the orthographic control conditions produced faster and more accurate responses to central targets, but performance in these two conditions did not differ significantly. Experiment 2 tested the same stimuli in a masked priming paradigm and replicated the standard finding in French that pseudohomophone primes produce significantly faster responses to target words than orthographic control primes. Therefore, contrary to its impact on masked priming, phonology does not contribute to effects of flanker relatedness, which would appear to be driven primarily by orthographic overlap.

## Introduction

In a seminal study, Dare and Shillcock (2013) asked their participants to make lexical decisions to centrally located target words and nonwords while adding a subtle yet powerful twist to this classic paradigm. They added two letters to the left and two letters to the right of target stimuli, separated from the targets by a single space. These flanker letters could either be part of the target word (*e.g.*, RO ROCK CK) or unrelated letters (*e.g.*, PA ROCK TH). Participants could ignore the flanking letters because they were irrelevant for the task (non-word targets were also flanked by related and unrelated letters). Dare and Shillcock found that lexical decisions were facilitated by related flanker bigrams, not only when they respected their order in the target (as in the above example), but also when the order was reversed (*e.g.*, CK ROCK RO). Crucially, they found the same amount of facilitation in these two conditions, a result that was to have important consequences for future theorizing.

In the present study, we examine the potential contribution of phonology to the effects of flanker relatedness obtained in the flankers task<sup>1</sup>. Effects of flanker relatedness reported by Dare and Shillcock (2013), Grainger, Mathôt, and Vitu (2014), and Snell, Bertrand, and Grainger (2018) have been interpreted as reflecting the spatial integration of orthographic information spanning target and flankers. But in written languages like English and French, orthography is systematically confounded with phonology such that effects interpreted as being driven by orthographic overlap across target and flankers could in fact be driven by phonological overlap. That is, rather than the letters R and O in the word ROCK, it could be the phonemes /R/ and /o/ in /Rok/ that could be driving flanker effects. Indeed, the reduced

---

<sup>11</sup> In prior work, we have used the terms “flanker paradigm” or “flanker task”. Here, we adopt the original terminology of Eriksen (*e.g.*, Eriksen, 1995).

effect of flanker relatedness found when switching letter order in the bigram flankers (*e.g.*, OR ROCK KC; Grainger et al., 2014) could be interpreted as reflecting a disruption in phonological processing rather than a disruption in orthographic processing using ordered sequences of letters. That is, reversing letter order would hamper any attempt to generate a correctly ordered sequence of graphemes prior to their conversion into a string of phonemes. At the same time, the absence of an influence of bigram order (Dare & Shillcock, 2013; Grainger et al., 2014) is evidence against a strictly sequential encoding of graphemes and phonemes that is inherent in all accounts of phonological recoding. This therefore points to orthographic representations as the locus of effects of flanker relatedness, as hypothesized by Grainger et al. (2014). Indeed, Grainger et al. (2014) explained their findings and those of Dare and Shillcock (2013) in terms of flanker and target stimuli activating a common pool of sublexical orthographic representations (a bag-of-bigrams)<sup>2</sup>. According to Grainger and Ziegler (2011), the very nature of these bigram representations (ordered contiguous and noncontiguous letter combinations— referred to as “open-bigrams”) implies that they are dedicated to processing orthographic information and are not involved in encoding phonological information because the encoding of phonological information from letter strings requires more precise letter position information (see also Grainger, Dufau, & Ziegler, 2016). Therefore, according to this specific interpretation of the flanker results of Dare and Shillcock (2013), there should be no influence of flanker–target phonological overlap in the lexical decision version of the flankers task (flanking letters lexical decision). Moreover, given the evidence in favor of a key role for phonology in silent reading for meaning (*e.g.*, Frost,

---

<sup>2</sup>It is the concept of an unordered set (a “bag”) of ordered letter combinations that allows this particular model to account for Dare and Shillcock’s (2013) findings.



1998), and particularly in a language like French with relatively consistent spelling-to-sound mappings, although our prediction is a null effect, it is a strong prediction.

In order to provide a stricter test of the orthographic hypothesis, in the present study we measured effects of orthographic flanker relatedness while manipulating the amount of phonological overlap between flankers and targets (either flankers and targets shared all their phonemes in the correct order or they differed by at least one phoneme). We apply one particular manipulation that has played a central role in uncovering fast automatic phonological processes in visual word recognition—that is, creating pseudoword stimuli that would typically be pronounced identically to an existing word—so-called pseudo-homophones. Using the masked priming technique (Forster & Davis, 1984), Ferrand and Grainger (1992) demonstrated that pseudo-homophone primes facilitated lexical decisions to target words compared with non-homophonic primes matched in orthographic overlap with targets (*e.g.*, roze–ROSE vs. rone–ROSE). This result replicated the findings of Perfetti and Bell (1991) obtained in a paradigm that combines masked priming with a perceptual identification task, and both studies converged to show that prime duration must be sufficiently long ( $\approx 60$  ms) in order to observe phonological priming over and above orthographic priming (see Ferrand & Grainger, 1993, for a time-course analysis; Grainger, Diependaele, Spinelli, Ferrand, & Farioli, 2003, for a replication; and Rastle & Brysbaert, 2006, for a review and meta-analysis). In Experiment 1, we test the same conditions as tested in Ferrand and Grainger (1992, 1993) and Grainger et al. (2003) in a flankers task, with prime stimuli becoming flanker stimuli that are repeated in the left and right positions.

## **Experiment 1**

### **Method**

#### **Participants**

Fifty-one students (45 females) from Lyon University, ranging in age between 18 and 29 years (mean age = 22 years, 1 month), gave informed consent to participate in this study. Participants were tested individually in a quiet room and reported being nondyslexic, native to the French language, and having normal or corrected-to-normal vision.

#### **Design and stimuli**

There were three flanker conditions (see Table 1). In the phonological condition (O+P+) the target was surrounded by pseudo-homophone flankers (*e.g.*, “roze rose roze”). In the orthographic-control condition (O+P-), the target was surrounded by the orthographic-control flankers that were pseudowords matched to the phonological flanker condition in terms of orthographic overlap with the target (*e.g.*, “rone rose rone”). In the unrelated condition (O-P-), the target was flanked by pseudowords that shared no letters or phonemes with the target (*e.g.*, “fuli rose fuli”). A Latin-square design was used such that each target appeared in only one condition for one participant, but in all conditions across all participants. A set of 108 French words and a set of 108 pseudowords served as target items in this Experiment. These 216 target items were four to five letters long (average length = 4.6 letters). Words were selected from the MANULEX lexical database (Lété, Sprenger-Charolles, & Colé, 2004). The mean frequency of these words in Zipf values (van Heuven, Mandera, Keuleers, & Brysbaert, 2014) was 5.1 (range: 3.5– 6.5), qualified as high lexical frequency according to MANULEX. The main criterion for word selection was that both a pseudo-homophone and a matched orthographic control pseudoword could be created, both

differing by a single letter at the same position from the corresponding target word. Finally, a set of 108 unrelated pseudoword flanker stimuli were constructed that differed maximally from the corresponding target word both orthographically and phonologically, while respecting the orthotactic and phonotactic constraints of French. The pseudoword targets were created from the set of word targets by a single letter substitution, and the flankers were created using the same procedure as for the word targets. There were 36 target words and 36 target pseudowords in each condition. An overview of the experimental conditions is provided in Table 1 (see the Appendix 1 for a full list of the materials).

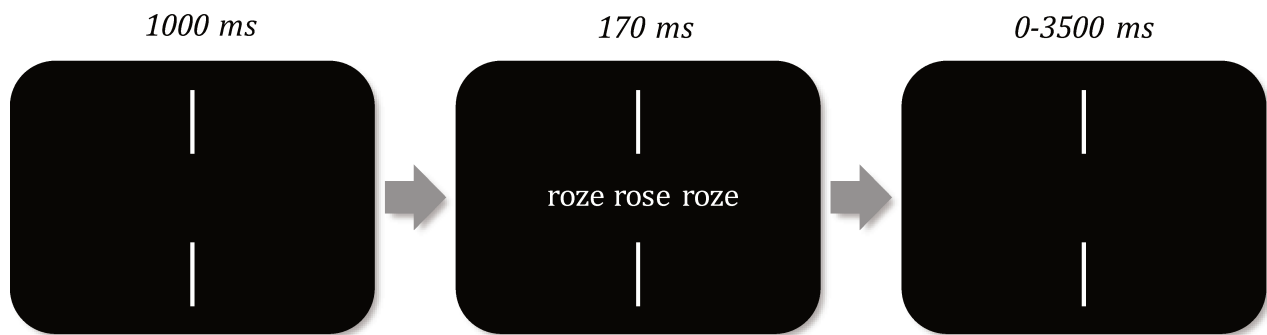
**Table 1.** Example target (center) and flanker stimuli in the three experimental conditions: pseudo-homophone flankers (O+P+), orthographic-control flankers (O+P-), unrelated flankers (O-P-).

| Conditions | Word                  | Pseudoword            |
|------------|-----------------------|-----------------------|
| O+P+       | roze <u>rose</u> roze | voze <u>vose</u> voze |
| O+P-       | rone <u>rose</u> rone | vone <u>vose</u> vone |
| O-P-       | fuli <u>rose</u> fuli | huna <u>vose</u> huna |

### Procedure

The experiment was implemented with OpenSesame (Mathôt, Schreij, & Theeuwes, 2012). Stimuli were presented on an HP ProBook 640 G2 monitor calibrated in 18-inch (1,366 × 768 px, 80 Hz). Stimuli were displayed in lowercase Courier New font (19 pts) in white on a black background. At a viewing distance of 40 cm, each character subtended approximately 0.33 degrees of visual angle. Manual responses were collected with the computer keyboard. Each trial started with two vertical fixation bars above and below a centralized fixation cross. After 1,000 ms, the central fixation cross disappeared, and the target (a word or a pseudoword), flanked by two pseudowords on each side, was presented

between the two vertical fixation bars (see Figure. 1). After 170 ms, the stimulus was blanked. Participants indicated as quickly and accurately as possible whether the target was a word or a pseudoword by pressing the right or the left button ('q' and 'm', respectively, on an AZERTY keyboard). The experiment lasted approximately 15 minutes. The 216 trials were divided into four blocks of 54 trials. The different blocks and the trials within a block were presented in a different random order for each participant. The task began with 36 practice trials followed by the main experiment.



**Figure. 1** Description of the procedure of Experiment 1. In this example, the target word 'rose' is flanked by the pseudo-homophone flankers 'roze'. After the fixation cross, target and flankers appear onscreen for 170 ms, and centred with respect to the vertical fixation bars. After the stimuli disappear, participants have a maximum of 3,500 ms to indicate whether the central stimulus was a word or not.

## Results

Only the data for word targets were analyzed. We first retained all trials with a response time (RT) lying between 300 and 3,000 milliseconds. The analyses of RTs excluded incorrectly answered trials for all stimuli (5.03%). Additionally, both the RTs and the error-rate analyses excluded trials with an RT beyond 2.5 standard deviations from the mean for each participant (2.49%). Data were analyzed in the R statistical computing environment (Core Team, 2018) using linear-mixed-effects models (LMEs), with items and participants as crossed random effects, fitted with the lmer function from the lme4 package (Version 1.1-21; Bates, Maechler, Bolker, & Walker, 2015). The maximal random effects structure that

converged was one including by-participant and by-item random intercepts. We conserved the same structure both for the RT and error rate analyses. The b values, standard errors (SEs) and t values (RTs) or z values (errors) are reported, with t and z values beyond  $|1.96|$  deemed significant (Baayen, 2008). A complementary Bayes factor analysis was performed using the `lmBF` function from the `BayesFactor` package (Version 0.9.12-4.2; Morey & Rouder, 2018). Each model was compared with the intercept-only model. Along with the LME analyses, we report the results of the Bayes factor analysis and the interpretation recommended by Lee and Wagenmakers (2013). For all significant effects in the LME analyses, we report the value of  $BF_{10}$  (evidence for  $H_1$  against  $H_0$ ), and we report  $BF_{01}$  (evidence for  $H_0$  against  $H_1$ ) for all nonsignificant effects.

**Table 2.** Mean RTs (in milliseconds) and errors rates (probabilities) for word targets (standard deviations in parentheses) accompanied by pseudo-homophone flankers (O+P+), orthographic-control flankers (O+P-), or unrelated flankers (O-P-) in Experiment 1.

| Conditions | RT       | Error rate  |
|------------|----------|-------------|
| O+P+       | 620 (69) | .038 (.042) |
| O+P-       | 613 (64) | .041 (.033) |
| O-P-       | 640 (66) | .071 (.063) |

Mean RTs per condition are presented in Table 2. The following analyses were conducted taking the unrelated condition as a reference. The phonological condition O+P+ was significantly faster than the unrelated condition O-P- in the RT analysis ( $b = -20.72$ ,  $SE = 3.42$ ,  $t = -6.06$ ;  $BF_{10} > 100$ , extreme evidence for  $H_1$ ), and the error rate was significantly decreased in the phonological condition as compared with the unrelated condition ( $b = -0.73$ ,  $SE = 0.16$ ,  $z = -4.48$ ;  $BF_{10} > 100$ , extreme evidence for  $H_1$ ). The orthographic-control condition O+P- was significantly faster than the unrelated condition in the RT analysis ( $b =$

-26.53, SE = 3.43,  $t = -7.74$ ;  $BF_{10} > 100$ , extreme evidence for H1), and the errors rate was significantly lower in the orthographic control condition ( $b = -0.59$ , SE = 0.16,  $z = -3.7$ ;  $BF_{10} = 41$ , very strong evidence for H1). In planned comparisons, we also analyzed the critical contrast between the phonological and orthographic-control conditions and found no significant difference between these two conditions in both the RT analysis ( $b = 5.95$ , SE = 3.37,  $t = 1.77$ ;  $BF_{01} = 7$ , moderate evidence for H0) and the error rate analysis ( $b = -0.16$ , SE = 0.18,  $z = -0.88$ ;  $BF_{01} = 22$ , strong evidence for H0). Although numerically fewer errors were made in the phonological flanker condition, the RTs were actually longer in that condition.

## **Discussion**

The results of Experiment 1 are straightforward. We found highly robust effects of orthographically related flankers on both RTs and error rates, with both the phonological flanker and the orthographic control flankers generating faster and more accurate responses to central target words compared with the unrelated flanker condition. On the other hand, the phonological and orthographic control conditions did not differ significantly, implying that phonological flanker-target overlap was not contributing to the effects of orthographically related flankers. However, before concluding that phonology does not contribute to the effects seen with orthographically related flankers, we need to demonstrate that the same stimuli exhibit the standard pattern of phonological priming effects reported in prior studies. To do so, we tested exactly the same stimuli in a masked priming experiment where flanker stimuli became prime stimuli accompanying the same set of target words and pseudowords.

## **Experiment 2**

### **Method**

#### **Participants**

Forty-five students (42 females) from Lyon university, ranging in age between 18 and 23 years (mean age = 20 years 7 month), gave informed consent to participate in this study. In this experiment, the participants were tested individually in a quiet room and reported being nondyslexic, native to the French language, with normal or corrected-to-normal vision.

#### **Design and stimuli**

The design and stimuli were the same as in Experiment 1, except that flanker stimuli now become prime stimuli in a masked priming experiment.

#### **Procedure**

Stimuli were displayed in lowercase Courier New font, in white on a black background. To avoid orthographic overlap between primes and targets, we applied different font size between these two. In this way the prime font size was 9 pts greater than the target font size, which was the same font size as the target and the flankers in Experiment 1 (19 pts). At a viewing distance of 40 cm, the prime and target characters subtended respectively 0.45 and 0.33 degrees of visual angle. Each trial started with two vertical fixation bars above and below a centralized fixation cross. After 1,000 ms, the prime was briefly presented for 70 ms<sup>3</sup> between the two vertical fixation bars, directly followed by the target presentation (a word or a pseudoword) for 170 ms (see Fig. 2). Target duration was the same as the flanker-target

---

<sup>3</sup> The choice of prime duration was determined by prior research in French using similar materials (Ferrand & Grainger, 1992, 1993; Grainger et al., 2003) showing that pseudo-homophone priming effects require prime durations in the range of 60–70 ms in order to emerge.

duration used in Experiment 1. Then, the target was blanked. Participants indicated as quickly and accurately as possible whether the target was a word or a pseudoword, by pressing the right or the left button ('q' and 'm', respectively, on an AZERTY keyboard). There were three priming conditions that mimicked the three flanker conditions of Experiment 1, with the flanker stimuli becoming primes. The experiment lasted approximately 15 minutes.

## Results

We applied criteria identical to those used in Experimental 1 for the exclusion of trials in Experiment 2. The analyses of RTs excluded incorrectly answered trials for all stimuli (5.66%). Additionally, both the RTs and the error rate analyses excluded trials with an RT beyond 2.5 standard deviations of the grand mean for each participant (2.94%). Mean RTs per condition are presented in Table 3. We again employed LMEs for the analysis of RTs and error rates. We used models with the maximal random structure that successfully converged. For the analysis of RTs, this was a model that included by-participant random intercepts and slopes and by-item random intercepts. The analysis of errors was performed with a model that included by-participant random intercepts and by-item random intercepts and slopes. We report b values, standard errors (SEs), and t values (RTs) or z values (errors), with t and z values beyond  $|1.96|$  deemed significant. We also report Bayes factor analyses as in Experiment 1.

The following analyses were conducted taking the unrelated condition as reference in the model. The phonological condition was faster than the unrelated condition in the RT analysis ( $b = -20.52$ ,  $SE = 3.51$ ,  $t = -5.83$ ;  $BF_{10} > 100$ , extreme evidence for H1). Error rates did not differ between these two conditions ( $b = -0.04$ ,  $SE = 0.22$ ,  $z = -0.19$ ;  $BF_{01} = 25$ , strong evidence for H0). However, contrary to Experiment 1, the difference between the



orthographic-control condition and the unrelated condition was not significant in the RT analysis ( $b = -7.29$ ,  $SE = 3.9$ ,  $t = -1.87$ ;  $BF_{01} = 6$ , moderate evidence for  $H_0$ ) as well as in the error-rate analysis ( $b = -0.09$ ,  $SE = 0.24$ ,  $z = -0.38$ ;  $BF_{01} = 25$ , strong evidence for  $H_0$ ). By restricting the analyses to the phonological and orthographic-control conditions (conditions of interest), we found that RTs in the phonological condition were significantly faster compared with the orthographic-control condition ( $b = -13.42$ ,  $SE = 3.51$ ,  $t = -3.82$ ;  $BF_{10} = 6$ , moderate evidence for  $H_1$ ). Error rates did not differ significantly between these two conditions ( $b = -0.08$ ,  $SE = 0.26$ ,  $z = 0.3$ ;  $BF_{01} = 24$ , strong evidence for  $H_0$ ).

**Table 3.** Mean RTs (in milliseconds) and errors rates (probabilities) for word targets (standard deviations in parentheses) accompanied by pseudo-homophone flankers (O+P+), orthographic-control flankers (O+P-), or unrelated flankers (O-P-) in Experiment 1.

| Conditions | RT       | Error rate  |
|------------|----------|-------------|
| O+P+       | 622 (62) | .057 (.045) |
| O+P-       | 636 (63) | .056 (.052) |
| O-P-       | 643 (69) | .056 (.061) |

## Discussion

The results of Experiment 2 perfectly replicate the findings reported by Ferrand and Grainger (1992, 1993) and Grainger et al. (2003) with a larger sample of stimuli and a larger sample of participants. These finding therefore provide additional support to the meta-analysis of Rastle and Brysbaert (2006) and reinforce their conclusion that pseudo-homophone priming effects are indeed ‘real’. Most important, however, is that the results of Experiment 2 confirm that the absence of an effect of phonological flanker overlap in Experiment 1 was not due to poor stimulus selection. However, given that the key result of Experiment 1 is a null effect, in order to provide a stronger test of the absence of an effect of

phonological target-flanker overlap in that experiment, we performed a combined analysis of Experiments 1 and 2 in order to test for an interaction with task (flankers vs. priming).

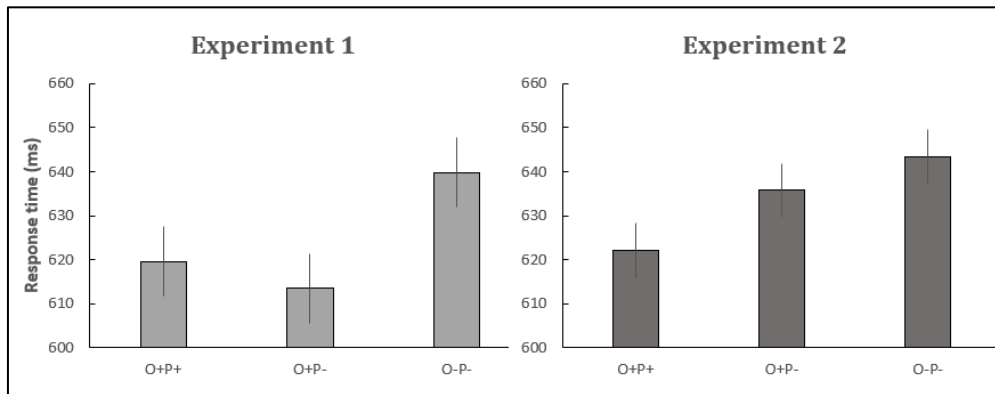
### **Combined analysis**

In the combined analysis, the three flanker/priming conditions tested in Experiments 1 and 2 were included as a within-participant factor, and task (flankers vs. priming) was included as a between-participant factor.

### **Results**

We again employed LMEs for the analyses of RTs and error rates using the maximal random structure that successfully converged. For the analysis of RTs, this was a model that included by-participant and by-item random intercepts. The analysis of errors was performed with a model that included by-participant random intercepts and by-item random intercepts and slopes. A Bayes factor analysis was also applied. In the phonological effects analysis, there was a significant interaction between condition (O+P+, O+P-) and task (flankers task, priming task), with a +14-ms phonological effect in the priming task compared with a -7-ms effect in the flankers task ( $b = -19.54$ ,  $SE = 4.9$ ,  $t = -3.99$ ;  $BF_{10} = 7$ , moderate evidence for H1). The interaction was not significant in the error rates ( $b = -0.20$ ,  $SE = 0.24$ ,  $z = 0.83$ ;  $BF_{01} = 31$ , very strong evidence for H0). In the orthographic effects analysis there was a significant interaction between condition (O+ P-, O-P-) and task (flankers task, priming task), with a +7- ms orthographic effect in the priming task compared with a +27- ms effect in the flankers task ( $b = 19.35$ ,  $SE = 4.9$ ,  $t = 3.94$ ;  $BF_{10} = 61$ , very strong evidence for H1). The interaction was also significant in the error rates ( $b = -0.55$ ,  $SE = 0.23$ ,  $z = 2.4$ ), but

the Bayes factor analysis yielded no evidence for this effect ( $BF_{10} = 0.99$ ). The condition means for RTs are shown in Figure 3.



**Figure 3.** Mean RTs in the pseudo-homophone (O+P+), orthographic control (O+P-), and unrelated (O-P-) conditions in Experiment 1 (flankers task) and Experiment 2 (priming). Error bars depict 95% confidence intervals.

## Discussion

The combined analysis of the results of Experiments 1 and 2 provide unequivocal evidence that effects driven by phonological information differ in the flankers task compared with masked priming. The significant interaction between the phonological contrast (O+P+, O+P-) and task indicates that effects of phonological overlap were significantly greater in priming. This provides further evidence that the absence of an effect of target-flanker overlap in Experiment 1 was not due to a lack of power or poor stimulus selection. Interestingly, the combined analysis also revealed a greater impact of orthographic overlap (O+P-, O-P-) in the flankers task relative to masked priming. This provides further support in favor of Grainger et al.'s (2014) interpretation of Dare and Shillcock's (2013) flanker effects as reflecting the spatial integration of orthographic information.

## General discussion

Experiment 1 was designed to test for effects of flanker–target phonological overlap in the flankers task. Prior research had manipulated flanker–target orthographic overlap (*e.g.*, Dare & Shillcock, 2013; Grainger et al., 2014; Snell, Bertrand, & Grainger, 2018) and concluded that the observed flanker effects were being driven by the spatial integration of orthographic information across flanker and target stimuli (Grainger et al., 2014; see Grainger, 2018, for a review). However, in all these studies flanker–target orthographic overlap was confounded with flanker–target phonological overlap, and therefore it might be that phonology was the source of effects of flanker relatedness. In this respect, it is important to note that Grainger et al. (2014) proposed that the spatial integration of orthographic information is achieved via open-bigram representations (Grainger & van Heuven, 2004; Whitney, 2001). Now, in the general framework for orthographic processing proposed by Grainger and Ziegler (2011); see also Grainger et al., 2016), open-bigram representations are dedicated to mapping letter-level representations onto whole-word orthographic representations and are not assumed to provide an appropriate code for associating letters with sounds (*i.e.*, phonological processing). Therefore, we predicted that phonological information is not integrated across stimuli in the flankers task. The results of Experiment 1 are in line with this prediction.

Experiment 2 was performed simply in order to check that the same stimuli tested in the flankers task of Experiment 1 would indeed show phonological effects in masked priming. This was found to be the case. Crucially, a combined analysis of the two experiments revealed a significant interaction between task (flankers vs. priming) and the contrast between pseudo-homophones and orthographic controls. Phonological priming effects were

significantly greater in masked priming than in the flankers task. Interestingly, the combined analysis also revealed that the contrast between orthographic controls and the unrelated condition was significantly greater in the flankers task than in masked priming (see Figure 3). Both of these patterns clearly point to a key role for orthographic representations in the spatial integration of information extracted in parallel from target and flanker stimuli in the flankers task. In the framework proposed by Grainger et al. (2014), these orthographic representations are open-bigrams (Grainger & van Heuven, 2004; Whitney, 2001), which are not suited for accurately generating a phonological representation from print, hence the absence of phonological effects in the flankers task in Experiment 1.

How might alternative theories of orthographic processing account for the present findings? Three of the major models in this field, Davis' (2010) spatial coding model, the Bayesian reader (Norris, 2006), and the overlap model (Gomez, Ratcliff, & Perea, 2008), all assign a flexible position to each individual letter identity in a string of letters. The assigned flexibility is chosen to be just enough to enable such models to capture transposed-letter effects (see Grainger, 2008, for a review) without creating havoc in normal word recognition. Just how such letter-position coding schemes can be applied to simultaneously process multiple stimuli has yet to be determined, and as such, Dare and Shillcock's (2013) findings remain a challenge for these models. Nevertheless, whatever the proposed mechanism, one important point remains: contrary to Grainger and Ziegler's (2011) model, the exact same letter representations are involved in orthographic processing and phonological recoding in these alternative models. Therefore, any adaptation of these models to account for Dare and Shillcock's (2013) findings will necessarily predict that flanker phonology effects should be obtained in conditions where orthographic effects are obtained.

Concerning the role of phonology in silent reading for meaning, it is important to point to the evidence that phonological representations can be activated by parafoveal stimuli, so it is not the eccentricity of the flanker stimuli that is cancelling the phonological effect in Experiment 1. Sentence reading experiments using the boundary technique (Rayner, 1975) have repeatedly shown that parafoveal previews that are phonologically related to the upcoming target word facilitate reading of that word compared with orthographic control previews. This is the case for both homophone previews (*e.g.*, Bélanger, Mayberry, & Rayner, 2013; Chace, Rayner, & Well, 2005; Pollatsek, Lesch, Morris, & Rayner, 1992) and pseudo-homophone previews (*e.g.*, Miellet & Sparrow, 2004; see Vasilev, Yates, & Slattery, 2019, for a review and meta-analysis). On the other hand, Tiffin-Richards and Schroeder (2015) failed to observe a preview effect with pseudo-homophones in their adult participants, with the effects only being significant in children. This raises the possibility that phonological flanker effects might be observable in beginning readers, given that it is well established that phonology plays a key role in the process of reading development (Grainger, Lété, Bertrand, Dufau, & Ziegler, 2012; Share, 1995; Ziegler, Perry, & Zorzi, 2014). Counter to this, however, is the finding reported by Chace et al. (2005) that only skilled readers show phonological parafoveal preview effects. Furthermore, although Bélanger et al. (2013) found effects of homophone previews in both skilled and less-skilled readers, they reported that the effects were only robust when the preview was a high-frequency word. On the other hand, there is evidence that phonological priming is not affected by word frequency (*e.g.*, Lukatela & Turvey, 1994).<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> In post hoc analyses, we examined the impact of word frequency on both flanker and priming effects by adding Zipf frequency as a continuous variable in the LME analyses. Although word frequency did

Why is there evidence for phonological parafoveal preview effects and no evidence for phonological flanker effects? In preview experiments, the preview and target occupy the same spatiotopic location along a line of text, and this enables integration of orthographic, phonological, semantic, and syntactic information at a given location (Snell, Meeter, & Grainger, 2017). Therefore, phonological information is indeed processed in the parafovea, but is not integrated within the central channel for word identification, as postulated in the work of Grainger et al. (2014) and Snell, Meeter, and Grainger (2017). However, failure to integrate phonological information across adjacent stimuli does not imply that phonological information is not processed within the central processing channel. Phonology has to be processed within the central processing channel (*e.g.*, Grainger et al., 2016) in order to account for phonological influences on single-word reading and sentence reading (Frost, 1998; Rastle & Brysbaert, 2006; Vasilev et al., 2019). The limitation of this processing relative to orthographic information is that it is tied to a specific spatiotopic location in a line of text. Our model therefore predicts that, contrary to phonological preview effects seen in sentence reading with the boundary technique, phonological parafoveal-on-foveal effects should not be observed in the same paradigm. That is, when reading the sentence ‘The boy picked the rose from the garden’, reading times of the target word ‘rose’ should not be influenced by the replacement of the parafoveal word ‘from’ with a pseudo-homophone ‘roze’ prior to the eyes moving to that location. This predicted null effect could be contrasted with well-established orthographic parafoveal-on-foveal effects obtained during sentence reading (Angele, Tran, & Rayner, 2013; Dare & Shillcock, 2013; Mirault et al., 2020; Snell, Vitu, & Grainger, 2017). Such

---

significantly affect RTs and errors in both Experiments 1 and 2, it did not interact with either flanker or priming effects (all  $t_s < 1.4$ ; all  $z_s < 1.2$ ).

additional experimentation would further help connect the results obtained with the flankers task and those obtained in more natural reading situations (for a recent debate, see Snell & Grainger, 2019a; and accompanying commentaries, Schotter & Payne, 2019; White, Boynton, & Yeatman, 2019).

Finally, one other issue concerns whether the absence of phonological flanker effects reported in the present study might be specific to French. The French language is characterized by very consistent spelling-to-sound mappings and inconsistent sound-to-spelling mappings. According to the orthographic depth hypothesis (Katz & Frost, 1992; see also Frost, 1998), it is the consistency in spelling-to-sound mappings that is critical in determining the relative involvement of phonological representations in the process of silent reading in a given language. Therefore, given that French is very consistent in this respect, we expect the null effect of flanker phonology to generalize to other alphabetic languages, and we suspect that the slightly greater consistency found in some languages such as Finnish and Italian should not make a significant difference. Of course, it might be possible that it is the inconsistent mapping of sound-to-spelling in French that causes the absence of flanker phonology effects. But then such an account of flanker effects would have to explain why the exact same stimuli produced robust phonological priming effects in the present study.

In sum, in the present work, using the flankers task, we have shown that while target-flanker orthographic overlap has a major impact on central target word processing, as attested by prior work, target-flanker phonological overlap has no influence whatsoever. This pattern contrasts with the findings obtained when the phonological relation concerns stimuli associated with the same spatiotopic location, as is the case in priming studies with central presentation of prime and target, and in parafoveal preview studies. Future research



could confirm this null effect of integration of phonological codes across distinct spatiotopic locations using a parafoveal-on-foveal manipulation during sentence reading.

### **Acknowledgments**

This research was supported by the European Research Council (ERC 742141) and the French National Research Agency (ANR 15-CE33-0002-01).

## 2.3 Conclusion

Les résultats de Grainger et Ferrand (1992, 1993) ont bien été répliqués dans la tâche d'amorçage masqué. De plus, il apparaît que dans une situation qui se rapproche d'une lecture naturelle -la tâche de Flankers-, les informations phonologiques pouvant être extraites en parafovéa ne sont pas intégrées pour le traitement du mot fixé. Nos résultats confirment donc le rôle clé des informations orthographiques dans les effets de flankers observés jusqu'à présent. Les informations phonologiques semblent être extraites uniquement lorsqu'il y a un recouvrement spatial des informations phonologiques et orthographiques comme en amorçage masqué. Lorsque les informations phonologiques sont spatialement distribuées à gauche et à droite du mot fixé, leur contribution n'est pas apparente. De prochaines études pourraient confirmer que ces résultats peuvent être observés dans d'autres langues que le Français.

Cette première étude permet ainsi de comprendre comment la disposition spatiale de stimuli alignés dans la Flankers Task permet de capter les effets directs des informations en bordure de vision et de tester le rôle des informations parafovéales sur le mot fixé. Ces mesures recueillies en Flankers Task sont cependant différentes de celles obtenues en oculométrie qui implique nécessairement des mouvements de déplacement du regard comme dans une situation de lecture naturelle. Nous considérons cependant que la Flanker Task permet d'étudier de façon simple et optimale les contributions des informations parafovéales lorsque l'œil est stationnaire, ce qui est beaucoup plus difficile à réaliser en oculométrie car l'information à présenter en parafovéa est plus difficile à manipuler.

## Chapitre 3 – Les études développementales

Ce chapitre introduit trois études développementales menées durant cette thèse en utilisant la tâche *Flanking Letter Lexical Decision*. Il y sera question d'explorer de façon approfondie comment les éléments en parafovéa interagissent avec le mot central durant la lecture chez l'enfant et de décrire les trajectoires associées à ces effets.

Le but était de fournir des données développementales sur les effets de flankers, or il est admis que cette population présente une grande variabilité comportementale plus on se rapproche du seuil de la 1<sup>ère</sup> année d'apprentissage de la lecture. En cela, la Flankers Task comporte deux avantages majeurs pour l'étude de l'intégration spatiale de l'information orthographique chez l'enfant. D'une part, en tant que tâche de décision lexicale dans laquelle seul un temps de réaction et la qualité de la réponse sont recueillis, elle est robuste et mobile car facilement implémentable dans un ordinateur portable pour tester de grands effectifs d'enfants en se déplaçant sur le lieu de l'école et/ou du collège. D'autre part, elle s'approche d'une situation de lecture naturelle et permet, malgré son apparente simplicité, une mesure précise de l'impact des informations en bordure de vision sur le traitement d'un mot central sans avoir recours à l'oculométrie. Ces deux avantages, portabilité et précision des mesures, permettent à la Flankers Task d'être très adaptée aux études avec des élèves de CP au CM2 (1-5<sup>ème</sup> année d'apprentissage de la lecture) chez lesquels on observe systématiquement des profils très hétérogènes des compétences en lecture au sein d'un même niveau. La tâche n'est pas rébarbative pour l'élève et ne demande pas une installation technique difficile.

Ce chapitre de cadrage théorique est composé de trois parties. Une première partie présente les modèles développementaux qui s'inscrivent dans notre problématique, en particulier le modèle *E-Z Reader* (Reichle, et al, 2011), d'une part, parce qu'il peut être considéré comme un concurrent direct d'*OB1-reader* (Snell et al., 2018d) et, d'autre part, parce qu'il comporte une version développementale (Reichle et al., 2013). Une seconde partie dresse un bilan des données empiriques obtenues dans les études développementales portant sur l'empan perceptif. Enfin, une troisième partie présente les études récentes qui ont examiné les capacités de traitement en parafovéa chez le lecteur débutant.

### **3.1 Les modèles développementaux de l'identification du mot écrit**

Comme évoqué en introduction, le traitement du mot écrit, c'est-à-dire le codage de l'identité des lettres à la bonne position, n'est pas inné, et doit faire l'objet d'un enseignement explicite (Ehri, 1992). Il est rendu possible par des connaissances préalables sur les unités linguistiques de bases que sont les lettres et les sons qui y sont associés. Les conceptions qui font foi dans le domaine postulent que l'apprentissage de la lecture repose principalement sur le recodage phonologique en considérant que c'est un mécanisme d'auto-apprentissage sur lequel repose l'élaboration des représentations orthographiques (Share, 1995). La procédure de conversion grapho-phonémique (CGP) est située au cœur des travaux qui se sont intéressés à la lecture chez l'enfant. L'un des enjeux principaux des modèles développementaux de l'activité de lecture a longtemps été de rendre compte de la façon dont s'effectue la procédure de CGP durant l'identification du mot écrit. La plupart des cadres théoriques partent du postulat que, pour prononcer correctement les mots lus, tout lecteur doit disposer de connaissances sur l'orthographe des mots (langage écrit) et sur la façon dont se prononcent les mots (langage oral). Dans la littérature, deux approches de la procédure de

CGP co-existent et considèrent différemment les traitements impliqués dans la mobilisation de ces deux types de connaissances pendant la lecture. D'un côté, les modèles à double voie proposent l'existence d'une voie de traitement permettant de retrouver directement la forme phonologique d'un mot à partir des graphèmes et d'une autre voie qui construit un code phonologique en appliquant des règles de conversions sur les correspondances entre orthographe et son (*e.g.*, Coltheart & Rastles, 1994 ; Coltheart et al., 2001). D'un autre côté, les modèles connexionnistes proposent qu'une seule voie permet de traiter ces deux types de connaissances et que les règles CGP ne relèvent pas d'un apprentissage explicite mais plutôt d'une émergence liée à l'exposition répétée au langage écrit (*e.g.*, Seidenberg & McClelland, 1989 ; Plaut et al., 1996 ; Ans, et al., 1998). On peut évoquer l'existence d'un troisième type de modèles qui constitue un système hybride des modèles à double voie et à voie unique qui sont les modèles à niveaux multiples de représentations (*e.g.*, Shallice et al., 1983 ; Norris, 1994), dans lesquels la CGP s'effectue grâce à une étroite coopération de processus basés sur les informations orthographiques, phonologiques, morphologiques et syllabiques.

Au moins deux constats peuvent être tirés lorsqu'on fait l'examen de la littérature de la modélisation de l'activité de lecture chez l'enfant. Premièrement, un nombre important de modèles computationnels de l'apprentissage de la lecture ont été développés sous l'impulsion de problématiques sociétales, comme la nécessité de mieux comprendre la lecture déficitaire (*e.g.*, Seidenberg & McClelland, 1989 ; Coltheart, et al., 2001 ; Perry, et al., 2007). Cependant, ces modèles peuvent être difficilement transposables pour expliquer comment le jeune normo-lecteur accède à la lecture experte. Deuxièmement, compte tenu de la variabilité comportementale dans la population des jeunes lecteurs, les études des

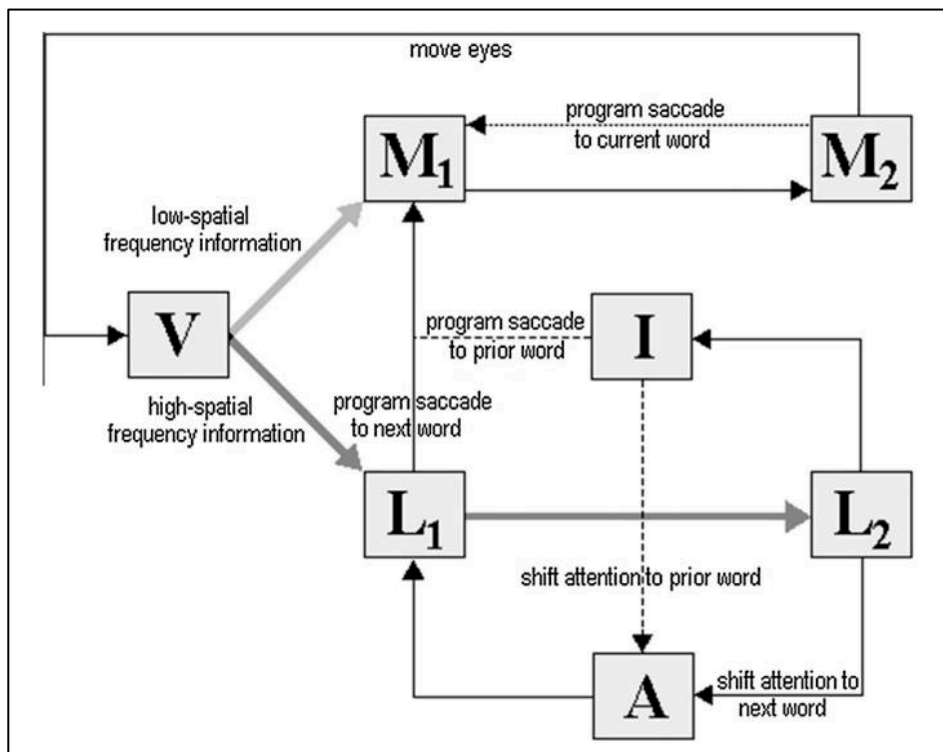
processus d'identification du mot écrit chez l'apprenti-lecteur sont moins abondantes que celles chez le lecteur expert ou déficitaire, ce qui conduit au constat que les simulations computationnelles de l'apprentissage de la lecture est un domaine de recherche qui peut fonctionner en relative autonomie (Sprenger-Charolles & Colé, 2015, pour des idées convergentes). On remarque toutefois une intensification des travaux sur l'apprenti lecteur durant cette dernière décennie allant de pair avec les tentatives de simulations computationnelles de l'apprentissage de la lecture. On peut toutefois avancer ici l'idée que la compréhension des procédures de CGP ou de tout autre mécanisme impliqué dans la lecture, nécessitent aussi bien l'étude de populations déficientes que l'étude de populations de lecteurs sans trouble.

La partie qui suit s'intéresse à une série de simulations de la lecture de phrases chez l'enfant de 8-9 ans effectuées par le modèle de lecture de phrase *E-Z Reader* (Reichle, et al., 2011). Elle propose une revue non-exhaustive du modèle et des simulations présentées par Reichle et al. (2013).

### **3.1.1 Le modèle *E-Z Reader***

Le modèle *E-Z Reader* (Reichle et al., 2011) est un modèle computationnel qui fournit une description sur la façon dont les processus perceptifs et cognitifs sont impliqués dans la lecture, et comment ces processus interagissent les uns avec les autres. Le modèle fournit également une description des systèmes qui programment et exécutent des saccades afin de pouvoir répliquer les données empiriques des études sur les mouvements oculaires observés pendant la lecture (Pollatsek et al., 2003, 2006 ; Reichle et al., 2009). *E-Z Reader* appartient à une classe de modèles de lecture de phrases nommée *Sequential Attention Shift* (SAS). Cette

classe de modèles suppose que le traitement du mot s'effectue de façon strictement sérielle, ce qui diffère de l'approche de traitements en parallèle de la classe de modèles *Parallel Graded* (PG) à laquelle appartient le modèle *OB1-reader* présenté en Chapitre 1. De ce fait, le modèle *E-Z Reader* s'appuie sur deux hypothèses de base : 1) le traitement des mots s'effectue de façon complètement sérielle sur un seul mot à la fois, impliquant que l'attention sur les mots soit également distribuée de façon sérielle, 2) le traitement complet d'un mot déclenche inévitablement une saccade. Cette deuxième hypothèse peut être conceptualisée comme une heuristique que les lecteurs experts acquièrent pour permettre une efficacité de lecture maximale. Un diagramme schématique du modèle est proposé en Figure 6. L'architecture du modèle et son fonctionnement sont décrits plus bas.



**Figure 6.** Diagramme schématique du modèle *E-Z Reader* (Reichle et al., 2011).

1) Au niveau du traitement visuel (étiquetée **V** dans le schéma), les entrées visuelles perçoivent un mot à la fois. À cette étape, les informations sont acquises à travers l'ensemble du champ visuel, indépendamment de l'endroit où se trouve le centre de l'attention. Mais comme le montre la figure 6, les deux types d'informations (basses et hautes fréquences) sont utilisées à des fins différentes. Alors que les informations de basses fréquences spatiales (disponibles en vision parafovéale) sont utilisées pour segmenter les mots à venir pour mieux cibler l'endroit de la saccade ultérieure, une plus petite partie des informations de hautes fréquences spatiales (disponibles en vision centrale) est sélectionnée par l'attention pour les besoins du traitement lexical.

(2) Au niveau de la vérification de la familiarité des mots (**L1** dans le schéma), le temps moyen requis pour effectuer ce contrôle sur le mot fixé  $n$  est modulé par la fréquence d'apparition d'un mot dans le texte, *i.e.*, la *cloze probability* d'un mot. Le mot  $n$  est inféré à partir de son contexte et le temps moyen pour terminer cette étape est fixé à 0 ms.

(3) Au niveau de l'accès lexical (**L2** dans le schéma), le mot nécessite cette fois un temps non nul pour être reconnu. Le mot peut être activé à partir de son sens, à partir du contexte de la phrase, ou à partir d'une combinaison des deux.

(4) Au niveau du déplacement de l'attention (**A** dans le schéma), l'achèvement de l'accès lexical provoque simultanément deux choses : la première est le déplacement de l'attention vers le mot  $n$ . S'il a été identifié, elle se déplace vers le mot suivant de sorte que le traitement lexical (*i.e.*, la vérification de la familiarité) puisse commencer. La deuxième est que l'intégration post-lexicale de la signification de ce mot commence.



(5) Au niveau de la phase d'intégration post-lexicale (**I** dans le schéma), l'intégration représente le temps minimal nécessaire au lecteur pour savoir que le sens du mot qui a été identifié s'inscrit bien dans le cadre sémantique et syntaxique de la représentation de la phrase en cours de construction. Étant donné que le traitement post-lexical d'un mot est normalement terminé en arrière-plan du traitement lexical en cours, il n'a donc aucun effet perceptible sur la progression des yeux dans le texte. Il est important de noter qu'un échec de l'intégration du mot peut amener les yeux et l'attention à se redéplacer vers le lieu de cet échec (voir Reichle et al., 2009). Ce dernier point est important parce que son implémentation a permis au modèle de simuler les régressions observées avec des phrases dont la syntaxe est ambiguë (*e.g.*, Frazier & Rayner, 1982) ou sémantiquement invraisemblable (Warren & McConnell, 2007).

(6,7) Au niveau des phases de programmation de saccades oculaires (**M1** et **M2** dans le schéma), les temps nécessaires pour terminer ces étapes labiles et non labiles de la programmation d'une saccade sont des valeurs aléatoires échantillonnées à partir de distributions probabilistes ayant des moyennes de 125 ms pour **M1** et de 25 ms **M2**. Cela permet au modèle d'expliquer le saut de mots.

Voici une description du fonctionnement du modèle : lors de la présentation d'une phrase au niveau des entrées visuelles (1), les yeux et l'attention sont sur le mot  $n$  et la phase de vérification de la familiarité débute (2), lorsque la vérification de la familiarité sur  $n$  se termine, cela enclenche la programmation d'une saccade pour déplacer les yeux vers le mot  $n + 1$ . Le traitement lexical (3) de  $n$  se poursuivra cependant jusqu'à ce qu'il soit identifié (c'est-à-dire l'achèvement des deux phases  $L$ ), amenant à un déplacement de l'attention (4) vers le mot  $n+1$  afin que le traitement parafovéal de ce mot puisse commencer. En parallèle

commence l'intégration post lexicale de  $n$  (5). À ce stade, deux choses peuvent se produire : la première est la programmation d'une saccade labile **M1** pour déplacer les yeux vers le mot  $n+1$  avant que la vérification de la familiarité sur le mot  $n$  ne se termine ; dans cette situation, le programme d'une saccade a atteint un point de non-retour et à l'issue de la phase non labile les yeux sont obligatoirement dirigés vers le mot  $n+1$ . La deuxième situation possible **M2** est que la vérification de la familiarité sur le mot  $n$  se termine avant la programmation d'une saccade labile pour déplacer les yeux sur le mot  $n+1$  ; dans la deuxième situation, une deuxième programmation de saccade labile (pour déplacer les yeux vers le mot  $n+2$ ) est enclenchée, annulant ainsi la première et aboutissant à ce que les yeux soient finalement dirigés vers le mot  $n+2$  et provoquant le saut du mot  $n+1$ .

Comme évoqué plus haut, *E-Z Reader* a été utilisé pour simuler le traitement du mot et les saccades oculaires d'enfants de 8-9 ans et d'adultes dans l'étude de Reichle et al. (2013). Cette étude permet de mettre en perspective les enjeux de la simulation des effets développementaux durant la lecture ; elle est également instructive sur le plan théorique.

### **3.1.2 Une simulation développementale du modèle *E-Z Reader***

L'étude de Reichle et al. (2013) a ciblé une population théorique d'enfants de 8-9 ans et d'adultes. Afin de proposer un paramétrage "enfant" du modèle, il s'agissait de tenir compte d'un grand nombre d'effets mis en évidence dans la littérature récente sur les mouvements oculaires et sur l'impact des facteurs cognitifs pendant la lecture. Pour ce qui concerne les mouvements oculaires, on sait que les enfants effectuent plus de fixations et des saccades plus courtes que les adultes, qu'ils ont une plus grande proportion de régressions et que le temps de traitement du mot est plus long que celui de l'adulte (voir pour une revue,

Blythe & Joseph, 2011). Pour ce qui concerne les facteurs visuels, on sait que l'empan perceptif est plus restreint chez les enfants et qu'ils sont supposés être moins capables d'utiliser la vision parafovéale pour identifier les lettres, les caractéristiques des lettres et les espaces vides entre les mots par rapport aux adultes (Häikiö et al., 2009). Les durées de fixation des enfants sont également plus longues et sont possiblement modulées par la fréquence des mots et le lieu de fixation (*e.g.*, Joseph et al., 2009).

Les simulations proposées par Reichle et al. (2013) avaient pour but de tester deux hypothèses fortes de la littérature concernant les mouvements oculaires et le traitement du mot écrit. La première hypothèse concerne le réglage oculomoteur. Selon cette hypothèse, les différences enfants-adultes reflètent le fait que les enfants sont moins habiles pour déplacer leur regard parce qu'ils sont plus lents à programmer des saccades (voir Klein & Foerster, 2001). La deuxième hypothèse concerne les compétences linguistiques. Selon cette hypothèse, les différences enfants-adultes reflètent le fait que les enfants sont moins compétents que les adultes pour identifier les mots écrits parce qu'ils rencontrent des difficultés liées à l'intégration orthographique qui ne permettent pas d'accéder dans un temps suffisant à leur signification (voir Perfetti, 2007). Pour tester ces hypothèses, une série de simulations a été réalisée à partir du corpus de phrases de Shilling et al. (1998) sur 1 000 sujets simulés. Dans ces simulations, les paramètres qui modulent le rythme et le mode de programmation et d'exécution d'une saccade, d'une part, et le traitement lexical et post-lexical, d'autre part, ont été systématiquement manipulés. Le but était de déterminer dans un premier temps quels paramètres pouvaient être ajustés pour produire le schéma global des mouvements oculaires et du traitement du mot observés chez les enfants qui ont été évoqués plus haut.

Les résultats des simulations ont montré que la plupart des données ont été répliquées. Dans ces simulations de lectures de phrases, le nombre de mots par minute, le nombre de fixations et la taille des saccades ont bien été répliqués par le modèle. Le modèle a été également performant pour tenir compte du nombre de régressions et de la durée de fixation d'un mot. Les deux hypothèses concernant le réglage oculomoteur et les compétences linguistiques ont été confirmées. Selon les auteurs, deux principaux paramètres<sup>1</sup> ont contribué à ce succès : 1) l'augmentation de la valeur d'un paramètre qui contrôle le taux de traitement lexical ; 2) l'augmentation de la valeur d'un paramètre qui contrôle la probabilité de défaut d'intégration du mot. D'après les auteurs, l'augmentation du premier paramètre était suffisante pour générer l'ensemble des résultats liés aux mouvements oculaires des enfants, et l'augmentation du second paramètre était suffisante pour permettre au modèle d'effectuer plus de régressions pour reproduire le comportement selon lequel les enfants sont plus lents que les adultes à détecter les violations de la plausibilité sémantique.

Les conclusions de Reichle et al. (2013) sont que les enfants ont besoin de plus de temps que les adultes afin de terminer l'intégration post-lexicale. Ils concluent également que sur la base de ces simulations, la principale raison des différences entre les mouvements oculaires des lecteurs débutants et experts sont des différences dans leur maîtrise du traitement lexical et, dans une moindre mesure, du traitement post-lexical. Les auteurs comparent leurs conclusions avec les affirmations de la littérature selon lesquelles la

---

<sup>1</sup> Le taux de traitement lexical est un paramètre de la phase L1 réglé à 104 ms par défaut pour les simulations chez l'adulte, il a été réglé à 208 ms pour les simulations chez l'enfant. La probabilité de défaut d'intégration du mot est un paramètre de phase I. Il a été multiplié par 10 entre les simulations chez l'adulte et les simulations chez l'enfant.

variation de la vitesse et de la précision du traitement lexical sert d'intermédiaire entre les différences inter-individuelles dans les compétences en lecture (*e.g.*, Ashby et al., 2005 ; Perfetti, 2007 ; Shilling et al., 1998).

Ainsi, sur la base de ces conclusions, on pourrait avancer l'idée que les principales différences entre les mouvements oculaires et l'identification du mot entre des lecteurs débutants et experts sont liées à leur maîtrise du traitement lexical rejoignant l'hypothèse de Perfetti (2007). Il est très intuitif de penser que pour transformer un lecteur débutant en lecteur expert, il suffit de le rendre plus efficient dans l'identification du mot, et qu'avec cette capacité augmentée, il atteindra la vitesse de lecture du lecteur expert. Un second point évoqué par Reichle et al. (2013) est que la complétion de l'intégration post-lexicale semble avoir joué un rôle dans ces simulations. Ce résultat est intéressant car il met en lumière le lien étroit qui peut exister entre les capacités de traitement du mot qui, lorsqu'elles s'améliorent, impactent un réseau plus large de compétences comme proposé par Share (1995).

Cette partie sur la modélisation s'achève sur la comparaison entre *E-Z Reader* et *OB1-Reader*, ce dernier étant notre fil conducteur pour le cadre théorique de cette présente thèse.

### **3.1.3 *E-Z Reader* et *OB1-reader* ou différentes approches de la lecture de phrases**

Quelles sont les différences majeures entre le modèle *E-Z Reader* et le modèle *OB1-reader* ? La réponse complète à cette question demanderait une analyse approfondie. Nous nous contenterons dans cette partie de cibler deux points d'intérêt. Premièrement, les deux modèles sont issus de deux domaines assez différents : le modèle *E-Z Reader* est un modèle

de simulation des mouvements oculaires lors de la lecture de phrases ; le modèle *OB1-reader* est également un modèle de simulation des mouvements oculaires mais développé à partir d'une tentative d'intégration des données sur la lecture de phrases et sur le traitement du mot. Deuxièmement, les approches adoptées par les deux modèles pour simuler la lecture sont différentes. *E-Z Reader* fait partie d'une classe de modèles qui suppose que le traitement du mot s'effectue sur un seul mot à la fois. *OB1-reader* fait partie d'une classe de modèles qui suppose que le traitement du mot s'effectue sur plus d'un mot à la fois.

Le premier point implique qu'*E-Z Reader* n'a pas vocation à être précis dans le domaine du traitement du mot et plus particulièrement dans les processus de codage orthographique. En effet, le modèle *E-Z Reader* effectue des saccades consécutives à un traitement complet sur le mot, mais ce traitement est avant tout basé sur les propriétés linguistiques (fréquence, prédictibilité) du mot fixé et pas sur une cascade de traitements linguistiques. Le modèle estime le temps de reconnaissance nécessaire pour une identification complète du mot, à l'aide de chaînes de calculs statistiques, basées sur les propriétés linguistiques du mot<sup>2</sup>. Pour *OB1-reader*, l'approche est complètement différente, le traitement du mot étant basé sur un principe de traitements en cascade. Le modèle dispose d'une interface dans laquelle l'intégration du mot consiste en l'activation de nœuds de sous-représentations orthographiques (bigrammes ouverts) qui activent à leur tour des nœuds de représentations de mots entiers. Ainsi, pour *OB1-reader*, la prise en compte des propriétés linguistiques du mot se fait effectivement lors d'une fixation mais elle constitue une étape finale de l'identification du mot. À titre d'exemple, on peut citer Reichle et al. qui évoquent la

---

<sup>2</sup> Dans le travail de Reichle (2013), on dénombre 4 principaux paramètres pour l'identification du mot :  $\alpha^1$  = le temps nécessaire pour le contrôle de la familiarité,  $\alpha^2$  = le temps des effets de la fréquence du mot,  $\alpha^3$  = le temps des effets de prédictibilité, et A = le temps de déplacement de l'attention fixé par défaut à 25 ms.

procédure d'intégration post-lexicale du mot dans leur modèle : "*the integration stage is a place holder for a deeper theory of postlexical language processing during reading*" ("l'intégration est un support pour une théorie plus approfondie du traitement post-lexical du langage pendant la lecture" (Reichle et al., 2009, p.6).

Le second point concernant la conception sérielle *versus* parallèle de la lecture, implique de considérer différemment le rôle de la répartition de l'attention dans le déplacement du regard et dans le lieu d'atterrissage d'une saccade oculaire. Pour *OB1-reader*, le rôle de l'attention dans l'empan perceptif est prépondérant. Le modèle suppose que l'attention spatiale est répartie non seulement à l'intérieur du mot mais également sur plusieurs mots à la fois (voir Snell & Grainger, 2019a pour une revue). La quantité d'attention sur le mot  $n+1$  est modulée par un gradient attentionnel visuo-spatial et sa reconnaissance est fonction de ce gradient. De ce fait, le lieu d'une saccade est déterminé par la saillance visuelle des formes des mots dans l'empan perceptif. Cette saillance est déterminée par l'acuité, l'encombrement visuel, l'excentricité et la proximité du centre d'attention. Les mots longs proches du centre d'attention sont généralement plus saillants que les autres, et sont donc sélectionnés comme cible de la saccade oculaire. En revanche, dans le modèle *E-Z Reader*, l'attention ne joue aucun rôle pour déterminer l'endroit d'une saccade, car c'est le premier mot non reconnu qui est sélectionné comme l'objectif de la saccade. Le modèle est fondé sur le principe général selon lequel l'ordre strict des mots est important pour la compréhension des phrases, les modèles SAS fonctionnent sur l'hypothèse que l'attention est allouée à exactement un mot à la fois et que l'attention passe d'un mot à l'autre en suivant un ordre sériel (Reichle et al., 1998, 2006). Cela permet à *E-Z Reader* d'être en mesure de rendre compte de nombreux phénomènes dans le comportement de lecture, tels que l'apparition de

sauts de mots (*i.e.*, les cas de glissement du mot  $n$  au mot  $n+2$ ) et les refixations (*i.e.*, les saccades qui mettent à jour la position de fixation de l'œil dans le même mot). Cependant, le modèle ne semble pas réaliste/plausible si l'on tient compte de la littérature sur la répartition de l'attention durant le traitement du mot. Pour cet aspect, on peut considérer qu'*E-Z Reader* imite le comportement plus qu'il ne l'explique.

Les deux modèles partagent cependant des similitudes qui n'ont pas été évoquées ici. La mise en lumière de leurs différences permet de mettre en perspective l'importance de la répartition de l'attention dans l'empan perceptif et des traitements en parafovéa dans le cadre théorique du modèle *OB1-reader*. La partie qui suit aborde les données les plus récentes qui ont rendu compte du développement de l'empan perceptif chez l'enfant et de son importance pour accéder à la lecture experte.

### **3.2 Le développement de l'empan perceptif**

Il y a plus de 80 ans, Woodworth (1938) posait déjà la question suivante "*How much can be read in a single fixation?*" ("Combien de mots pouvons-nous lire en une seule fixation ?"). Pour amorcer la réponse à cette question, nous pouvons d'abord avancer que la quantité d'informations qui peut être extraite au cours d'une fixation en lecture est étroitement liée aux compétences en lecture, comme montré par Rayner (1986). Il a constaté en particulier que l'augmentation des compétences en lecture va de pair avec la capacité d'extraire davantage d'informations sur la longueur des mots à droite de la fixation. D'autres travaux ont observé que la vitesse de lecture augmente proportionnellement avec la taille de l'empan perceptif (*e.g.*, Know et al., 2007). Nous verrons que cette conception a évolué pour considérer que, dans l'empan perceptif, toutes les informations disponibles au lecteur ne sont



pas traitées de la même façon et que l'on peut partitionner l'empan en fonction de la nature des informations qui y sont traitées (Häikiö et al., 2009). De plus, il existe une tranche d'âge à l'intérieur de laquelle l'empan perceptif augmente de façon plus importante.

### **3.2.1 La taille de l'empan perceptif et ses composantes en fonction de l'âge**

La première étude qui a fourni des données précises sur le développement de l'empan perceptif chez les enfants est sans conteste l'étude de Rayner (1986). En utilisant l'oculométrie dans le paradigme de la fenêtre mobile (McConkie & Rayner, 1975), Rayner a évalué la taille de l'empan perceptif chez des jeunes lecteurs de 2<sup>ème</sup>, 4<sup>ème</sup> et 6<sup>ème</sup> année et chez des adultes experts. Les participants devaient lire des phrases dans des fenêtres mobiles de différentes tailles. Les résultats ont mis en évidence une augmentation de la taille de l'empan perceptif en fonction du nombre d'années d'apprentissage de la lecture : l'empan était de 11 caractères pour les enfants de 2<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> année, de 14 caractères pour les 6<sup>ème</sup> année, et de 14-15 caractères pour les adultes (voir Tableau 1). La conception de Rayner (1986) était qu'à l'intérieur de l'empan perceptif différents types d'informations sont extraites mais que l'essentiel du traitement s'effectue dans la zone la plus proche de la fixation du regard (3 ou 4 caractères à gauche de la fixation et environ 5 ou 6 caractères à droite de la fixation). Selon Rayner, au-delà de cette zone, ce sont des informations moins précises telles que les premières lettres des mots, les traits caractéristiques des lettres et les informations sur la longueur des mots, utiles pour programmer une saccade oculaire qui sont extraites par le lecteur. On remarque là les conceptions majeures qui allaient servir de base au développement du modèle *E-Z Reader* 25 ans plus tard.

Plus récemment, une étude menée par Häikiö et al. (2009) a proposé d'opérer une distinction entre deux composantes à l'intérieur de l'empan perceptif. L'idée avancée était que l'empan perceptif peut être partitionné en deux composantes qui participent différemment au traitement des mots : d'une part, l'empan de traitement de l'identité des lettres et, d'autre part, l'empan de traitement des caractéristiques des lettres. Pour comparer les résultats avec ceux de Rayner (1986), les mêmes classes d'âges (2<sup>ème</sup>, 4<sup>ème</sup> et 6<sup>ème</sup> année et adultes) et les mêmes tailles de fenêtre (de 7 à 19 caractères) ont été utilisées. La manipulation expérimentale a alterné trois conditions afin de différencier l'empan de l'identité des lettres de l'empan des caractéristiques des lettres : une condition caractéristique-identité (C+I+) dans laquelle les informations sur l'identité et sur les caractéristiques des lettres étaient conservées ("Here is *a preview* showing eleven letter"), une condition C+I- dans laquelle les caractéristiques visuelles des lettres étaient maintenues mais où l'identité des lettres en dehors de la fenêtre n'était pas maintenue ("Kono la *a preview* sbcmlyu aixau isffsna")<sup>3</sup>, et une condition contrôle C-I- dans laquelle les informations sur l'identité et sur les caractéristiques des lettres n'étaient pas conservées en dehors de la fenêtre ("Xxxx xx *a preview* xxxxxxxx xxxxxx xxxxxxxx"). Les résultats, comparé à ceux de Rayner (1986), sont synthétisés au Tableau 1.

**Tableau 1.** Nombre de lettres disponibles à droite de la fixation rapporté dans l'étude d'Häikiö et al. (2009) et dans l'étude de Rayner (1986).

|   | 2 <sup>ème</sup> année | 4 <sup>ème</sup> année | 6 <sup>ème</sup> année | Adultes |
|---|------------------------|------------------------|------------------------|---------|
| Identité de lettres (Häikiö et al., 2009) | 5                      | 7                      | 9                      | 9       |
| Caractéristique de lettres (Rayner, 1986) | 7                      | 11-12                  | 11-12                  | 11-12   |
| Longueur de mots (Rayner, 1986)           | 11                     | 11                     | 14                     | 14-15   |

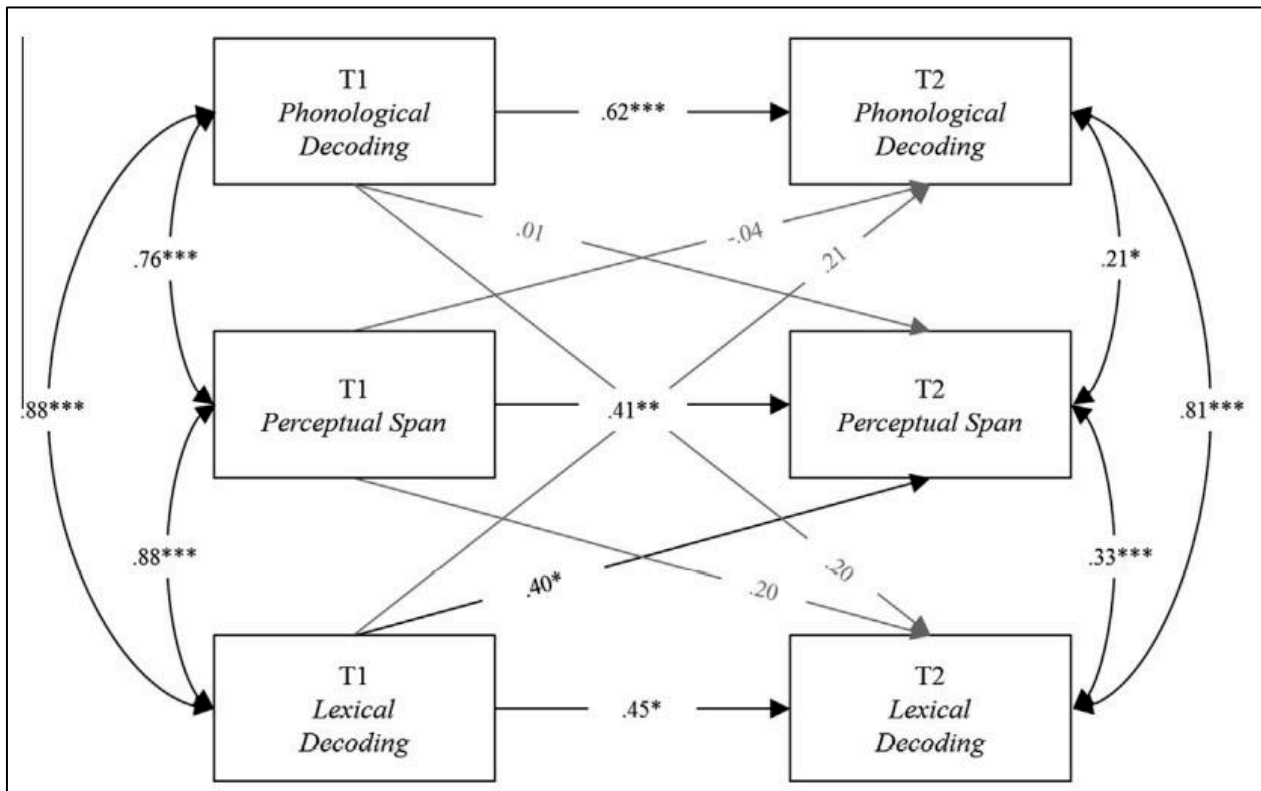
<sup>3</sup> Les traits caractéristiques des lettres ont été maintenues en remplaçant systématiquement les lettres de la phrase initiale par des lettres qui avaient les mêmes caractéristiques visuelles (e.g., o avec c et h avec d).

L'empan de l'identité des lettres des élèves de 2<sup>ème</sup> année a été estimé à 5 caractères à droite de la fixation. Ce résultat implique que même après un an d'enseignement de la lecture, l'empan de l'identité des lettres s'étend déjà jusqu'à la fin du mot fixé et jusqu'au début des lettres du mot suivant. Pour les 4<sup>ème</sup> année, l'empan de l'identité des lettres s'étend sur environ 7 caractères à droite de la fixation. Pour les 6<sup>ème</sup> année et les adultes, l'empan d'identité des lettres est d'environ 9 caractères à droite de la fixation. Il est important de noter que l'étude d'Häikiö et al. (2009), menée en finnois avec des mots plus longs et parfois moins fréquents qu'en anglais, a répliqué les tailles d'empan perceptif observées par Rayner (1986). Ce qui amène à considérer la possibilité de généraliser ces résultats à l'ensemble des systèmes d'écriture alphabétique.

### **3.2.2 Tranches d'âges pivot pour le développement de l'empan perceptif**

Pour conclure cette partie sur le développement de l'empan perceptif, il apparaît important de savoir s'il existe une tranche d'âge pendant laquelle le développement de l'empan perceptif est le plus important. En effet, la plupart des études en oculométrie qui ont ciblé des groupes d'âges inférieur à la 3<sup>ème</sup> année d'apprentissage (entre la 1<sup>ère</sup>-3<sup>ème</sup> année) font état de la même observation : pour toutes les mesures oculométriques, la différence entre les élèves de 1<sup>ère</sup> et de 2<sup>ème</sup> année est plus grande que la différence entre les élèves de 2<sup>ème</sup> et de 3<sup>ème</sup> année à l'exception de l'empan perceptif (*e.g.*, McConkie et al., 1991 ; Blythe et Joseph, 2011). Dans une étude récente, Sperlich et al. (2015) ont analysé les données de mouvements oculaires de jeunes lecteurs allemands entre la 1<sup>ère</sup>-3<sup>ème</sup> année d'apprentissage de la lecture afin de savoir si les effets des tailles de la fenêtre mobile impactaient la lecture

dans ces groupes d'enfants. Les résultats ont mis en évidence que tous les groupes d'âge étaient significativement impactés par la taille de la fenêtre mais principalement les enfants de 3<sup>ème</sup> année. De plus, les résultats de cette étude ont montré que l'impact de la taille de la fenêtre était plus important entre la 2<sup>ème</sup> et la 3<sup>ème</sup> année qu'entre la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup>, ce qui était compatible avec les résultats des études précédentes (McConkie et al., 1991 ; Blythe et Joseph, 2011).



**Figure 7.** Diagramme schématisé du modèle CLP (Sperlich et al., 2016) montrant le déroulement temporel et les corrélations entre les capacités de décodage phonologique, la taille de l'empan et le codage lexical-orthographique.

Ce patron de résultats suggère que l'empan perceptif peut s'accroître seulement lorsque les processus d'identification du mot sont suffisamment efficaces (voir Meixner et al., 2021 pour un constat similaire). C'est la conclusion avancée par Sperlich et al. (2015) qui considèrent que les processus d'identification des mots doivent d'abord se mettre en place

pour que le lecteur puisse exploiter l'ensemble des informations à l'intérieur de l'empan perceptif. Par la suite, Sperlich et al. (2016) ont mené une étude longitudinale d'une année chez des enfants de 1<sup>ère</sup> 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> année. Cette étude a fourni des corrélations entre les capacités de décodage lexical, phonologique et la taille de l'empan perceptif. Le modèle *Cross-Lagged Panel* (CLP) établi par les auteurs est présenté en Figure 7.

La modélisation a montré que les capacités de décodage lexical au T1 expliquaient significativement la variance de l'empan perceptif au T2 et, qu'en revanche, l'empan perceptif au T1 ne prédisait ni le décodage phonologique, ni le décodage lexical au T2. En somme, ce modèle fournit des preuves que le développement des compétences de base en lecture, principalement les capacités de décodage, précède le développement de l'empan perceptif, au moins dans les trois premières années de l'apprentissage de la lecture. L'ensemble des résultats de l'étude de Sperlich et al. (2016) peut être résumé comme suit. Premièrement, les résultats ont répliqué les observations de Sperlich et al. (2015) selon lesquelles les processus d'identification des mots se développent plus tôt que la taille de l'empan perceptif. Deuxièmement, les mesures de mouvements oculaires ont révélé des différences stables entre les lecteurs initialement plus lents et plus rapides et un effet Matthieu<sup>4</sup> (Stanovich, 1986) a été observé entre la 2<sup>ème</sup> et la 3<sup>ème</sup> année pour le taux de mot lus et entre la 3<sup>ème</sup> et la 4<sup>ème</sup> année pour la taille de l'empan perceptif : les enfants lents en lecture et qui n'ont pas acquis le même niveau de traitement linguistique que leurs pairs montreront plus tard des déficits en vitesse de lecture et auront une taille d'empan réduite. Une nouvelle fois, cela soutient l'idée selon laquelle le développement de l'empan perceptif nécessite la maturation

---

<sup>4</sup> L'effet Matthieu tire son nom d'un verset du Nouveau Testament (Matthieu 25, 29) : *Car on donnera à celui qui a, et il sera dans l'abondance, mais à celui qui n'a pas, on ôtera même ce qu'il a.*

des processus de base de la lecture pour atteindre la taille de l'empan perceptif du lecteur expert. Les processus de base de la lecture renvoient notamment à l'analyse visuelle précoce de la suite de caractères, le traitement orthographique du mot, au moins pour les mots fréquents (*i.e.*, le traitement de l'identité des lettres à la bonne position) et le traitement lexical.

En conclusion de cette partie, plusieurs instructions peuvent être tirées sur le développement de l'empan perceptif. Premièrement, l'augmentation de la taille de l'empan perceptif se fait graduellement au cours de l'apprentissage de la lecture. Deuxièmement, les informations ne sont pas traitées de la même façon à l'intérieur de l'empan perceptif, le traitement effectué sur des localisations proches du point de fixation semble relever d'un traitement plus profond de l'identité et des traits des lettres ; le traitement effectué à des localisations excentrées semble quant à lui exploiter des informations de plus bas niveau *i.e.*, les traits des lettres uniquement. Cette partition des traitements est apparente dès la 2<sup>ème</sup> année d'apprentissage de la lecture. Troisièmement, des études rendent compte d'une tranche d'âge pivot pour le développement de l'empan qui se situerait entre la 2<sup>ème</sup>-3<sup>ème</sup> année d'apprentissage. Quatrièmement, il semble que le développement de l'empan perceptif se mette progressivement en place avec le développement des processus de base de la lecture et notamment les capacités de traitement lexical.

La partie qui suit aborde la question du développement du traitement en parafovéa. Cette partie est cruciale pour rendre compte de la question de l'intégration spatiale de l'information orthographique chez l'enfant. On observe que les données rapportées dans ces études convergent vers l'idée d'une zone parafovéale participant au traitement du mot fixé en fovéa et qui pourrait être en mesure de traiter plus d'un mot à la fois.

### **3.3 Le développement du traitement en parafovéa**

À la lumière des informations rapportées ci-dessus, on comprend que c'est à l'intérieur de l'empan perceptif que s'effectue la lecture des mots écrits et qu'une taille optimale doit être atteinte chez l'apprenti-lecteur pour lui permettre de progresser vers la lecture experte. Dès lors, les processus d'intégration spatiale des informations traitées en parafovéa avec celles traitées en fovéa apparaissent comme décisifs pour la mise en place de cette expertise en lecture.

Au cours de la dernière décennie, plusieurs études ont rendu compte des capacités de traitement en parafovéa chez l'enfant. Parmi ces études, certaines ont fait état d'un traitement en parafovéa qui émerge de façon graduelle au cours de l'apprentissage de la lecture (*e.g.*, Sperlich et al., 2015, 2016). À travers les études de Khelifi et al. (2015, 2017), nous posons la question de la plausibilité du traitement en parafovéa chez l'enfant. Nous nous demandons si ces capacités relèvent d'un traitement de nature purement visuel ou s'il peut relever d'un traitement de nature linguistique. À travers une étude de Milledge et al. (2021), nous allons plus loin en tentant de savoir quelles sont les parties du mot en parafovéa qui sont traitées. Considérées ensemble, ces deux études nous donnent des indications sur l'âge au cours duquel apparaissent ces capacités de traitement en parafovéa chez l'enfant.

#### **3.3.1 Le traitement de l'identité des lettres en parafovéa chez l'enfant**

Khelifi et al. (2015) ont évalué les capacités de traitement des informations en parafovéa chez des enfants de 3<sup>ème</sup>-5<sup>ème</sup> année d'apprentissage de la lecture et chez des adultes lecteurs experts. La question posée dans cette étude était de savoir si les enfants pouvaient traiter des informations linguistiques en parafovéa et si ce traitement se faisait à

un niveau purement visuel ou à un niveau abstrait sur l'identité des lettres. Les auteurs ont effectué deux expériences en utilisant une tâche de décision lexicale dans laquelle une amorce était présentée durant 150 ms. Dans l'expérience 1, le plan expérimental était constitué de trois conditions de recouvrement de l'amorce avec la cible : une condition de recouvrement total où l'amorce et le mot cible étaient identiques (*poids*, *poids*), une condition de recouvrement partiel où seulement les trois premières lettres de l'amorce étaient identiques à la cible (*poire*, *poids*) et une condition non reliée où l'amorce était un mot sans rapport avec la cible (*blanc*, *poids*). Une deuxième variable a consisté à faire varier la localisation des amorces dans le champ visuel qui pouvaient être affichées soit dans le champ visuel droit, soit dans le champ visuel gauche. Dans l'expérience 2, la même tâche que celle de l'expérience 1 a été utilisée, à la seule différence que la casse de caractères variait entre l'amorce et la cible, les amorces étant affichées en majuscules et les cibles en minuscules. Les résultats de cette étude ont montré que les amorces parafovéales ont impacté l'identification du mot cible chez tous les participants dans tous les groupes. Dans les deux expériences, les cibles ont été identifiées plus rapidement dans la condition de recouvrement total que dans la condition non-reliée dans tous les groupes. Ces résultats ont suggéré que dès la 3<sup>ème</sup> année d'apprentissage de la lecture, les enfants sont capables de traitement en parafovéa. De plus, les résultats ont montré un avantage pour l'identification des mots dans le champ visuel droit. Cet avantage du champ visuel droit a été constaté dans les deux expériences chez les enfants de 5<sup>ème</sup> année et chez les lecteurs experts, mais uniquement dans la première expérience pour les enfants de 3<sup>ème</sup> année (amorce et cible de même casse). Ce patron de résultat suggérait que cette asymétrie vers le champ visuel droit est installée chez les enfants de 5<sup>ème</sup> année au même titre que chez le lecteur expert, mais que cette asymétrie n'est pas encore très stable



chez les lecteurs de 3<sup>ème</sup> année. En ce qui concerne le nombre de lettres traitées en parafovéa, le temps d'identification du mot consécutivement à la présentation des amorces complètes et partielles différait entre les deux expériences. Dans l'expérience 1, tous les lecteurs ont davantage bénéficié des amorces complètes par rapport aux amorces partielles. En effet, les amorces partielles n'ont engendré aucun effet de facilitation de la 3<sup>ème</sup> à la 5<sup>ème</sup> année. Ce dernier résultat a suggéré que tous les lecteurs en développement exploitent au moins les trois premières lettres des amorces en parafovéa. En revanche, dans l'expérience 2, le type d'amorçage (partiel ou complet) avait des effets différents selon le groupe : les enfants de 3<sup>ème</sup> année bénéficiaient autant des amorces partielles que des amorces complètes alors que les enfants de 5<sup>ème</sup> année bénéficiaient plus des amorces complètes. Etant donné le changement de casse de caractères entre l'amorce et la cible dans l'expérience 2, tout avantage observé dans cette condition résultait vraisemblablement d'un traitement au niveau de l'identité abstraite des lettres.

Si d'autres preuves de traitements en parafovéa chez l'enfant ont pu être apportées en lecture de phrases (*e.g.*, Tiffin-Richards & Schroeder, 2015 ; Marx et al., 2015), l'étude de Khelifi et al. (2015) confirme que les traitements qui interviennent en parafovéa sont observables assez tôt chez l'enfant, dès la 3<sup>ème</sup> année d'apprentissage de la lecture. De plus, les résultats semblent corroborer les données rapportées par Häikiö et al. (2009) qui ont mis en évidence que l'empan de traitement de l'identité des lettres est étroit pendant la 2<sup>ème</sup> année d'apprentissage mais continue à se développer jusqu'à la 6<sup>ème</sup> année. L'asymétrie de traitement pour les amorces de droite, à savoir, l'effet net entre les conditions complètes et partielles plus important dans le champ visuel droit que dans le champ visuel gauche dans les groupes d'enfants, est corroborée par plusieurs études antérieures. Par exemple, une

étude menée chez l'adulte par Ducrot et Grainger (2007) a montré que des fixations à gauche du centre du mot sont moins dommageables que les fixations à droite pour le traitement du mot. En effet, l'attention visuelle peut être allouée plus rapidement et plus efficacement à droite qu'à gauche chez les lecteurs experts. Des données similaires ont été obtenues chez l'enfant par Ducrot et al. (2013) dans une étude auprès d'un vaste échantillon d'enfants de la 1<sup>ère</sup> à la 5<sup>ème</sup> année d'apprentissage de la lecture en utilisant une tâche d'amorçage parafovéal. Les résultats de cette étude ont montré que les amorces qui étaient présentées dans le champ visuel droit engendraient des temps de réaction plus courts dans tous les groupes.

À la suite de l'étude de Khelifi et al. (2015), une seconde étude est venue préciser pourquoi les amorces partielles n'avaient pas facilité le traitement du mot cible chez les enfants. En effet, deux raisons pouvaient expliquer cette absence d'effet : 1) la compétition lexicale entre l'amorce partielle et le mot cible due au fait que l'amorce est un mot existant ; 2) l'encombrement visuel entre l'amorce partielle et le mot cible dû au fait que les trois dernières lettres de l'amorce sont différentes de celles du mot cible. Afin de supprimer les effets éventuels de la compétition lexicale et de l'encombrement visuel, Khelifi et al. (2017) ont utilisé les trois mêmes conditions que celles de l'étude de 2015 mais avec des lettres de masquage "x" qui remplaçaient les lettres différentes entre l'amorce et la cible : une condition complète (*numéro*, *numéro*), une condition partielle avec deux lettres maintenues (*nuxxxx*, *numéro*) et une condition partielle avec quatre lettres maintenues (*numéxx*, *numéro*). Les résultats ont montré que la condition d'amorce complète était facilitatrice pour les enfants de 5<sup>ème</sup> année et les adultes. En revanche, cette condition n'était pas facilitatrice pour les enfants de 3<sup>ème</sup> année lorsqu'on la comparait aux deux conditions d'amorçage partiel. Concernant la question des effets de compétition lexicale et d'encombrement visuel,

l'absence de facilitation des amorces de recouvrement partiel a conduit les auteurs à conclure que l'effet de l'amorçage partiel observé dans l'étude de Khelifi et al. (2015) était causé par un effet d'encombrement visuel et non par une compétition lexicale entre l'amorce et le mot cible.

### **3.3.2 Un codage relatif de l'identité des lettres en parafovéa chez l'enfant ?**

Des preuves récentes ont mis en évidence que des jeunes lecteurs sont capables de prétraitement sur des mots entiers  $n+1$  en parafovéa. De plus, ce prétraitement est particulièrement impacté par des substitutions de lettres aux extrémités du mot.

L'étude de Milledge et al. (2021) a étudié la possibilité d'un traitement flexible de l'identité des lettres sur le mot parafovéal. Les auteurs ont utilisé le paradigme des frontières visuelles avec un groupe d'enfant de 3<sup>ème</sup> année et un groupe d'adulte en faisant varier six conditions de substitution de lettres sur le mot parafovéal. Le plan factoriel comprenait quatre conditions impliquant toutes des substitutions de trois lettres : substitution des lettres externes de début de mot (ddd456), des lettres internes de début de mot (1ddd56), des lettres internes de fin de mot (12ddd6) et des lettres externes de fin de mot (123ddd). Par exemple, pour le mot cible *number* dans la phrase "Kelly always chooses her lucky *number* to play the lottery", selon la condition, les substitutions de lettres étaient localisées à différents endroits à l'intérieur du mot (*e.g.*, *numtoc*, *nuvtor*, *navter*, *savber*). Il y avait également deux conditions contrôle : une condition identité où le mot cible était simplement répliqué en parafovéa (*number*-*number*) et une condition sans rapport où le mot cible n'avait aucune lettre en commun avec le mot parafovéal (*savtoc*-*number*). En premier lieu, les résultats ont montré que tous les participants, enfants et adultes, affichaient un coût de

traitement sur la condition qui manipulait les lettres externes de fin du mot (123ddd), ce qui signifiait que le prétraitement parafovéal est effectué jusqu'à la fin du mot sans être contraint par les limites de l'acuité. En second lieu, tous les participants ont affiché des temps de lecture plus rapides lorsque la substitution portait sur les lettres internes (1ddd56 et 12ddd6), plutôt que sur les lettres externes (ddd456 et 123ddd). Ce résultat indique que l'identité des lettres externes du mot cible a impacté plus fortement le traitement du mot parafovéal, et cela plus que l'identité des lettres internes, mettant en évidence l'importance des lettres externes en parafovéa pour l'identification du mot cible. En troisième lieu, concernant les conditions manipulant les lettres externes (ddd456 et 123ddd), les résultats ont montré que les enfants, comme les adultes, étaient sensibles aux substitutions des premières lettres du mot, et cela très tôt dans leur traitement lexical. En effet, dans le contraste entre la condition de substitutions de lettres externes et la condition contrôle (ddd456 vs. 123456), l'effet était de 30 ms chez l'enfant et de 35 ms chez l'adulte, différence non significative. Ce résultat suggère que le statut privilégié de la ou des premières lettres dans le mot parafovéal intervient très tôt, et cela à la fois chez l'adulte et chez l'enfant. Enfin chez les adultes, le biais des premières lettres n'a pas été observé dans le contraste entre les deux conditions de substitutions de lettres externes (ddd456 vs. 123ddd), alors qu'il était présent chez les enfants. Ce résultat indique que les premières lettres jouent un rôle plus important que les dernières dans le traitement parafovéal chez l'enfant. Cette observation est cohérente avec des résultats antérieurs de Pagán et al. (2016) dans une tâche semblable. Les auteurs ont mis en évidence un biais du premier bigramme du mot en parafovéa chez des enfants de 4<sup>ème</sup> année d'apprentissage. Les auteurs ont expliqué ce résultat par la possibilité qu'un effet de masquage latéral affecte les capacités de traitement au centre du mot parafovéal chez l'enfant

ce qui privilégierait les lettres externes du mot parafovéal et plus précisément les premières lettres. Ce résultat est en accord avec une étude de la répartition de l'attention sur des chaînes de lettres chez l'adulte qui montrent que les taux de report de lettres en fonction des positions prennent la forme d'une fonction sérielle en W (Tydgate & Grainger, 2009). Un point intéressant de cette étude est que la manipulation de lettres internes modifiait inévitablement deux syllabes dans le mot car les mots choisis avaient tous une structure CVCCVC alors que la manipulation de lettres externes ne modifiait qu'une seule syllabe. Pourtant, il est apparu que c'est la manipulation de lettres internes (affectant deux syllabes) qui favorisait le traitement parafovéal par rapport à la manipulation de lettres externes (affectant une seule syllabe). Selon les auteurs, les avantages tirés des substitutions de lettres internes, par rapport aux substitutions de lettres externes, suggèrent que les enfants comme les adultes n'étaient pas sensibles à l'ordre absolu des lettres dans le mot en parafovéa mais plutôt à l'ordre relatif des lettres. Selon Milledge et al., ces résultats vont dans le sens d'un traitement assez grossier en parafovéa de type *coarse grained*, ce qui est en accord avec le modèle de Grainger et Ziegler (2010). Plus largement, ces résultats confortent les modèles qui adoptent un système de codage des lettres en position relative dans le mot (*e.g.*, Parallel Open-Bigram, Grainger & van Heuven, 2003 ; SOLAR, Davis, 2010 ; SERIOL, Whitney, 2001) plutôt qu'un système de codage en position absolue (*e.g.*, IAM, McClelland & Rumelhart, 1981).

Pour conclure cette partie, on peut noter que les données sur le traitement en parafovéa chez l'enfant ont plutôt tendance à s'accorder. Les deux études rapportées ci-dessus soulignent toutes deux l'importance des lettres externes des mots situés en parafovéa en vue d'identifier le mot cible. On a pu voir grâce à la première étude de Khelifi et al. (2015)

que les enfants commencent à opérer des traitements sur les mots en parafovéa dès la 3<sup>ème</sup> année d'apprentissage de la lecture. Ce traitement en parafovéa concerne potentiellement les deux ou trois premières lettres du mot chez l'enfant de 3<sup>ème</sup> année, et s'étend à la totalité du mot dès la 5<sup>ème</sup> année. On peut noter également qu'il existe une différence de traitement des amorces entre les champs visuels. Le champ visuel droit semble être plus sensible aux informations parafovéales pour l'identification du mot cible que le champ visuel gauche. Enfin, l'étude de Milledge et al. (2021) a confirmé le rôle des lettres externes dans le mot parafovéal et a conforté la conception d'un codage flexible de la position des lettres, en position relative plutôt qu'en position absolue.

Le Chapitre qui suit présente notre première étude chez l'enfant qui a abordé la question du traitement en parafovéa chez le lecteur débutant de la 1<sup>ère</sup> année à la 6<sup>ème</sup> année d'apprentissage de la lecture.

## **Chapitre 4 – Etude 2 : l’attention s’étend au-delà du mot fixé chez les lecteurs débutants**

### **4.1 Positionnement théorique**

Dans cette deuxième publication, nous avons étudié les trajectoires développementales de l’intégration spatiale de l’information orthographique. La littérature s’accorde sur l’idée que c’est entre la 2<sup>ème</sup> et la 3<sup>ème</sup> année d’apprentissage de la lecture que les enfants sont capables de traiter les informations en parafovéa. Pour Sperlich et al. (2015), la taille de l’empan perceptif augmente davantage entre la 2<sup>ème</sup> et la 3<sup>ème</sup> année qu’entre la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> année, ce qui laisse supposer que les enfants situés dans cette tranche d’âge pourraient bénéficier de l’information en parafovéa. De plus, des preuves de capacités à traiter les informations parafovéales chez l’enfant ont été fournies par Khelifi et al. (2015, 2017) qui ont montré que le traitement parafovéal des traits visuels débute dès la 3<sup>ème</sup> année, alors que le traitement parafovéal de l’identité des lettres n’intervient qu’à partir de la 5<sup>ème</sup> année.

Dans le présent travail, nous avons testé 113 enfants de la 1<sup>ère</sup> à la 6<sup>ème</sup> année d’apprentissage de la lecture en utilisant la Flankers Task. Le plan expérimental a alterné cinq conditions où les flankers étaient soit des bigrammes orthographiquement reliés (ro rock ck), non-reliés (pa rock th), ou inversés (ck rock ro) par rapport au mot cible, soit des mots entiers répétés (rock rock rock), ou différents (path rock path) autour du mot cible. Nous avons également ajouté une condition contrôle de mot isolé où le mot cible était présenté sans flanker (rock). Des études chez l’adulte présentées au Chapitre 1 (Grainger et al., 2014 ; Snell et al., 2018b), ainsi que notre propre étude 1 présentée au Chapitre 2, ont réussi à

montrer un effet bénéfique de la relation orthographique apporté par les flankers tant pour des bigrammes que pour des mots entiers répétés. À notre connaissance, aucune étude n'a utilisé la Flankers Task chez l'enfant de l'école primaire et de collège. La présente étude était destinée à combler ce manque par une investigation des effets de flankers dans un large échantillon d'élèves d'école primaire et de collège.



## **4.2 Attention extends beyond single words in beginning readers**

Joshua Snell, Christophe Cauchi, Jonathan Grainger & Bernard Lété

*Attention, Perception & Psychophysics*, 2021, Volume 1:83, Pages : 238-246

Copyright: The Author(s) 2021

<https://doi.org/10.3758/s13414-020-02184-y>

Soumis le 19 juin 2020 ; Accepté le 16 octobre 2020

## **Abstract**

A common notion is that during the first stages of learning to read, attention is narrowly focused so as to encompass only a single or a few letters. In skilled adult readers, however, attention extends beyond single words. The latter is evidenced by faster recognition of words that have many letters in common with surrounding words, along with correlations between such integration effects and measures of attention. These premises suggest that the distribution of attention gradually increases as a function of reading skill, and that this progression can be mapped by measuring spatial integration effects across the course of reading development. The latter was undertaken in the present study, in which we employed the flanker paradigm combined with the lexical decision task. Children in grades 1–6 (N = 113) were shown central target words flanked by various types of orthographically related and unrelated flanking stimuli. Against expectations, significant effects of flanker relatedness on word recognition speed were found in the youngest children, and this effect was not modulated by reading age. Our results challenge the notion that attention is focused on single letters in beginning readers, and instead suggest that, from the earliest stages of reading development, orthographic processing can extend beyond single words.

## Introduction

To what extent does experience determine the amount of information readers can extract from the visual field in a single glance? By most accounts of reading development, beginning readers are thought to apply a strictly sequential processing strategy, both in terms of letter-in-word processing as well as word-in-sentence processing. The main theoretical motive here is processing capacity: the untrained system has to spend more effort recognizing letters and words, and would therefore allow for processing of limited portions of information at once (*e.g.*, Ans, Carbonnel, & Valdois, 1998). Some empirical observations seem to attest to this conception. Beginning readers process sentences with more fixations and shorter saccades than do skilled readers (Rayner, 1986). Additionally, when allowing only five characters to be visible at once (the so-called moving window technique), this inflicts a cost of approximately 70% in skilled readers' reading speed, while inflicting a mere 30% cost in beginning readers (Rayner 1986; see also Blythe, Liversedge, Joseph, White, & Rayner, 2009; Sperlich, Schad, & Laubrock, 2015).

Many would agree also that sequential processing of letters within words is eventually replaced by parallel letter processing (*e.g.*, Adelman, Marquis, & Sabatos-DeVito, 2010). Indeed, research has shown that parallel letter processing even extends well beyond the fixated word in skilled adult readers, with words being recognized faster if they have many letters in common with adjacent words (Dare & Shillcock, 2013; Grainger, Mathôt, & Vitu, 2014; Inhoff, Radach, Starr, & Greenberg, 2000; Snell, Vitu, & Grainger, 2017; Snell, Bertrand, Meeter, & Grainger, 2018a; Snell, Bertrand, & Grainger, 2018b). In further revealing differences between beginning and skilled readers in this regard, Khelifi, Sparrow, and Casalis (2017) found that the recognition of foveal target words was facilitated by

parafoveally presented repetition primes (relative to unrelated primes) in fifth graders and adults but not in third graders. It therefore seems reasonable to claim that readers' processing span increases with experience.

However, more detailed accounts of how the processing span evolves during reading development cannot be constructed without resolving some theoretical ambiguities. As has been recognized by others (*e.g.*, Kwon, Legge, & Dubbels, 2007), it is not yet clear whether the processing span is constrained by purely linguistic factors, low-level visual operations, or both. Kwon et al. (2007) provided evidence for differences in visual processing across the course of reading development. They found that the recognition of single letters in peripheral regions of vision (relative to foveal letter recognition) improved with increasing age and correlated with reading speed. On the other hand, Rayner (1986) evidenced the involvement of linguistic factors, as the processing span of fourth-grade readers, when provided with easier age-appropriate texts, approximated that of adult readers. Relatedly, employing the moving window technique, Sperlich et al. (2015) found that increasing limitations on the availability of parafoveal information hampered reading more severely in third-graders than second-graders, while such window size effects did not differ between second- and first graders. This led the authors to conclude that the perceptual span in developing readers is mainly contingent on the automation of basic word recognition processes (*e.g.*, orthographic processing). Indeed, some have expressed the belief that beginning and skilled readers extract equal amounts of visual information from the visual field during each fixation, but that skilled readers have more rapid access to letter and word codes (*e.g.*, Jackson & McClelland, 1979; Neuhaus, Foorman, Francis, & Carlson, 2001). Such reasoning seems to dissociate between at least two types of processing span: one representing low-level visual

processing (conceivably up to the level of feature detection) that would remain stable from the first moments of learning to read, and the other being a span of orthographic and lexical processing that would increase in size with experience.

Following a synthesis of the above, to claim that the perceptual span is smaller in beginning readers (*e.g.*, Khelifi et al., 2017; Kwon et al., 2007) might be overly simplistic. Rather, it appears that there exist more intricate differences between beginning and skilled readers with respect to the amount of information they extract from the visual field. Visuo-spatial attention may be the common denominator here. It is already known that how attention is distributed across the visual field is strongly determined by tasks and contexts: for instance, whereas in the classical Eriksen flanker task using non-linguistic stimuli (Eriksen & Eriksen, 1974), attention was found to be biased to the left (Harms & Bundesen, 1983); in flanker tasks that employ word stimuli, attention is biased to the right (Snell & Grainger, 2018), analogous to the attentional bias observed during sentence reading (Rayner, 1998). Bearing this in mind, one way to reconcile reports that parafoveal letter detection is worse in beginning readers (Khelifi et al., 2017; Kwon et al., 2007) with reports that the perceptual span of beginning readers can under the right circumstances match that of skilled readers (Rayner, 1986), is to hypothesize that the artificial nature of the tasks employed by Kwon et al. and Khelifi et al. (respectively trigram identification and sequential presentation of words at different locations) affected the attentional distribution in beginning readers differently to that of skilled readers. When engaged in “real” reading, however, the attentional distribution may be quite similar between beginning and skilled readers, with linguistic difficulty determining not so much the size of the processing span but rather the depth of processing (features, letters, or whole words) across the span.

## **The present study**

Taken together, it is clear that the field has not yet converged towards a concrete account of the processing span during reading development. Aiming to provide a stride in the right direction, here we report an investigation into the distribution of visuo-spatial attention in young readers. The central objective of this study was to provide a direct test of the common notion that attention is narrowly distributed in beginning readers and widens with experience.

We built on recent lines of research in which we established a fairly simple way to track the distribution of attention. Snell, Mathôt, Mirault, and Grainger (2018c) found that aforementioned orthographic spatial integration effects, whereby words are recognized faster when surrounded by the same words (*e.g.*, rock rock rock) compared to different words (step rock step) (Dare & Shillcock, 2013; Snell et al., 2017, 2018a, 2018b), correlate with the distribution of covert (*i.e.*, without looking) visual attention. They made use of the principle that pupillary light responses (whereby the pupils dilate or constrict as the result of observing dark or bright things, respectively) are triggered not just by the things we look at directly, but also by the things we attend to covertly (for a review, see Mathôt & van der Stigchel, 2015). Implementing this in a flanker paradigm wherein participants made lexical decisions about central target words surrounded by words either on the left and right or above and below the target, Snell et al. (2018c) found that pupil size was contingent with the brightness of flanking words left and right of the target, but not flanking words above and below the target. Perfectly in line with this asymmetry, recognition speed was influenced by the orthographic relatedness of flanking words left and right of the target, but not flanking words above and below the target; this suggests that attention is indeed allocated to the

stimuli involved in orthographic integration effects (see also Snell, Meade, Meeter, Holcomb, & Grainger, 2019, for electroencephalographic evidence against pre-attentive accounts of orthographic integration effects).

Due to its methodological simplicity, the flanker paradigm provides the perfect means to track the attentional distribution in beginning and skilled readers: specifically, attention can be claimed to extend beyond single words in those readers who show an influence of the orthographic relatedness of flankers on target recognition speed.

Naturally, one drawback of the flanker paradigm is that it is unlike natural (sentence) reading. Should we find here, for instance, that portions of attention are allocated to the parafovea, it remains to be seen whether beginning readers exhibit similar patterns when reading sentences. Interestingly, however, studies with adult readers have thus far shown that attention, as observed through orthographic integration effects, operates quite similarly between these two settings (Dare & Shillcock, 2013; Snell et al., 2017; Snell & Grainger, 2018). For instance, the rightward attentional bias inherent to sentence reading also occurs in the flanker paradigm, reflected by a stronger impact from rightward word flankers (Snell & Grainger, 2018). Such findings lead to the belief that a flanker paradigm with words does to a certain degree engage participants in “real” reading – at least with respect to the attentional distribution (see Snell & Grainger, 2019a, for a more detailed outline of this rationale).

One must nonetheless take note of some methodological challenges integral to the employment of this paradigm with young populations. In previous implementations of this paradigm, brief (150-ms) stimulus durations were key to being able to argue for parallel letter and word processing. Given that this is barely enough time to recognize single words

(with estimations of average word recognition speed being in the 150 to 250 ms range; *e.g.*, Rayner, 1998), the flankers must be processed during rather than after target processing if they are to have any influence on target recognition. However, considering that word recognition is much slower in beginning readers (*e.g.*, Rayner, 1986, 1998), 150 ms is not sufficient for this population to perform the lexical decision task above chance level. Indeed, during pilot testing, we found that age influenced the minimal duration needed to make lexical decisions with a reliability above 60%. Specifically, our least proficient participants (N = 44, sampled from grades 1 and 2) required a stimulus duration of 300 ms, while 250 ms sufficed for children of intermediate proficiency (N = 69, sampled from grades 3, 4, 5, and 6) (see also Seabra, Dias, Mecca, & Macedo, 2017). This difference may be regarded as a potential confound when interpreting interactions between flanker relatedness effects and reading age. Therefore, in addition to testing for modulatory effects of reading age in the entire sample, we also carried out the same analyses on the subset of participants for whom we used a consistent 250-ms presentation time.

In addition to the various flanker conditions outlined below, we also included a no-flanker condition that allowed us to investigate the impact of the presence of surrounding stimuli *per se*. The mere establishment of flanker relatedness effects would have allowed us to claim that attention is widely distributed in our population; but we would not have been able to determine whether that wide attentional distribution is the default state or rather the result of surrounding stimuli inevitably drawing processing resources away from the fixated word. If we were to find that effects of flanker presence are modulated by reading age, this would allow us to formulate an account of the relationship between reading experience and attentional control.



## **Methods**

### **Participants**

One hundred and thirteen children from a public elementary school (grades 1–5; N = 99) and from a public secondary school (grade 6; N = 14) in Lyon, France, were tested at the end of their school year in June. These children were included on the basis of having a reading proficiency matching that of their grade (pre-tested with the Alouette reading test; Cavalli et al., 2018; Lefavrais, 1967), and on the basis of having an accuracy score >60% in the main experiment. All participants were native French speakers with normal or corrected-tonormal vision. Informed consent was provided by the participant's caregivers prior to experimentation. Ethical approval for this study was granted by the Comité de Protection des Personnes SUD-EST IV (No. 17/051) in Lyon.

### **Stimulus selection and materials**

One hundred-and-twenty-word pairs were selected from the Manulex lexical database (Lété, Sprenger-Charolles, & Colé, 2004). All words were four letters long, were classified as Grade 1 in the Manulex corpus (meaning that these words are regularly encountered by beginning readers), and contained no diacritics. The mean frequency of these words was 2.55 log parts per million (ppm) (range 0.78—3.94 log ppm). The word set included verbs, adjectives, participles, pronouns, adverbs, and auxiliaries. None of the words in each pair were orthographically or semantically related, and these pairs of words were used to generate the target words and the unrelated flanker words. A set of 120 pseudoword pairs were generated with Wuggy (Keuleers & Brysbaert, 2010). These were used to induce the lexical decision task, and were thus not included in our analyses. The complete list of stimuli is presented in Appendix 2.

## Design and statistical power estimation

We employed six conditions that can be subdivided into two independent manipulations of flanker relatedness (meaning the study did not have a fully crossed design). The first three conditions were adapted from the study of Grainger et al. (2014), who used bigram flankers in a repetition condition (*e.g.*, ro rock ck), a condition that switched bigram flankers (ck rock ro) and an unrelated bigram flanker condition (st rock ep). The remaining three conditions were adapted from the study of Snell and Grainger (2018), which used whole-word flankers: a repetition condition (rock rock rock), an unrelated condition (step rockstep), and a no-flanker condition. An overview of all experimental conditions is provided in Table 1. We verified that none of the targets formed a new word when combined with one of its bigram flankers (which could otherwise have biased lexical decisions).

**Table 1** Stimuli across experimental conditions. Although these examples are in English, we used French words (and also note that pseudoword stimuli were used as filler trials)

|                    | <b>Word</b>    | <b>Pseudoword</b> |
|--------------------|----------------|-------------------|
| Repetition bigrams | ro rock ck     | zo zock ck        |
| Switched bigrams   | ck rock ro     | ck zock zo        |
| Unrelated bigrams  | st rock ep     | st zock el        |
| Repetition words   | rock rock rock | zock zock zock    |
| Unrelated words    | step rock step | stel zock stel    |
| No flankers        | rock           | zock              |

With a Latin-square design we ensured that all items (*i.e.*, both words and pseudowords) were shown in all conditions, but only once per participant. The total of 240 trials was presented in randomized order.

The total of 2,260 measurements per experimental condition (pseudoword trials excluded) meets the recommendation of Brysbaert and Stevens (2018) for having abundant statistical power (their recommendation being 1,600 measurements per condition). We additionally estimated statistical power ad hoc based on data from the study of Snell and Grainger (2018). In our previous study, in which we also employed repetition flankers and unrelated flankers, we observed a mean 36-ms difference in response time based on 2,000 measurements per condition, with a Cohen's  $d = 0.30$ . Statistical power was estimated using simulations with the *simR* package (Green & MacLeod, 2016) in the R computing environment. When drawing 200 random samples and using the linear mixed model structure reported in Snell and Grainger (2018), a significant effect was returned 96.38% of the time; hence an estimated power of 0.96. Given that we performed a higher number of measurements per condition in the present study, we expect to have had abundant statistical power. All data are available at <https://osf.io/9jkt6/>.

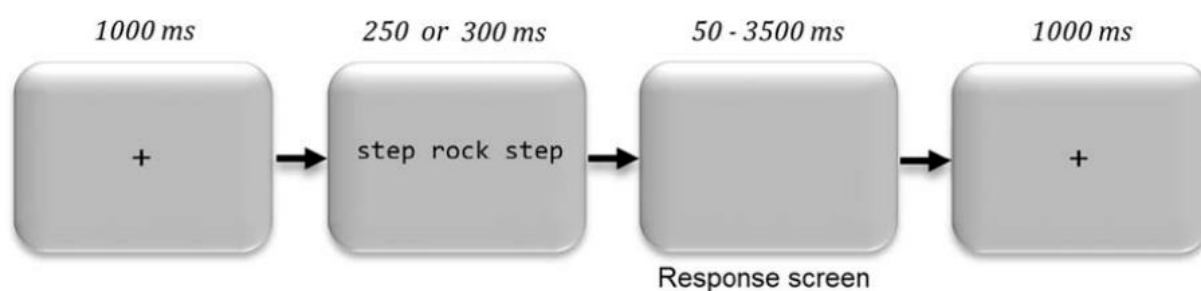
### **Apparatus and software**

The stimuli and experimental design were implemented with OpenSesame (Mathôt, Schreij, & Theeuwes, 2012). Stimuli were presented on an HP ProBook 640 G2 monitor calibrated in 18-in. (1,366 × 768 px, 80 Hz). Participants were seated at a 60-cm distance from the display. Stimuli were displayed in lower case, Courier New font, black color on light grey background. Each character space subtended  $0.35^\circ$  of visual angle.

### **Procedure**

The trial procedure is shown in Fig. 1. Each trial started with a 1,000-ms centralized fixation cross. The target and flanking stimuli were then presented for a duration depending on the participant's grade (300 ms for grades 1 and 2; 250 ms for grades 3 and beyond).

Participants had a maximum of 3,500 ms to make their lexical decision with a right- (“m”) or left-handed (“q”) button press (AZERTY keyboard layout) for respectively word and pseudoword targets. The response was followed by a 1,000-ms empty blank screen preparing the next trial. The trials were subdivided into ten blocks of 24 trials. To avoid fatigue, a break was offered in between blocks. The total duration of the task was about 20 min.



**Fig. 1** Procedure used in the Experiment. Targets and flankers were presented for a brief duration of either 250 or 300 ms, depending on the participant’s reading age. The size of stimuli relative to that of the display is exaggerated in this example

## Results

As noted under Participants, our 113 participants all had an accuracy score > 60%. For the analysis of response times (RTs), we excluded incorrectly answered trials (21.40% of trials) and trials with a response time (RT) beyond 2,500 ms (1.45% of the correctly answered trials). For the analysis of errors, the latter criterion led to the exclusion of 4.39% of trials.

Although pseudoword trials were merely employed as filler trials to induce the task (and are therefore not included in our analyses of interest), we did assess task performance in pseudoword trials to verify that children performed the lexical discrimination task above

chance. Error rates (ERs) for pseudoword trials were analogous to those observed in word trials across all levels of proficiency (overall,  $ER_{\text{word}} = 0.21$ ,  $ER_{\text{pseudo}} = 0.26$ ).<sup>1</sup>

Data were analyzed using linear mixed-effect models (LMMs) with flanker condition and reading age as independent variables, and items and participants as crossed random effects. We used models with the maximal random structure that successfully converged. For the analyses of RTs, this was a model that included by-item and by-participant random slopes for the condition factor, alongside random intercepts. The analysis of errors was performed with a model that only included by-item and by-participant random intercepts. We report *b*-values, standard errors (SEs), and *t*-values (RTs) or *z*-values (errors), with *t*- and *z*-values beyond  $|1.96|$  deemed significant.

Below, results are reported for two sets of conditions. The first section presents results for the bigram flanker conditions. The second section presents results for the whole-word and no-flanker conditions. As noted in the Introduction, direct tests of an interaction between flanker relatedness and reading age were performed both on the entire sample, as well as on the 69 most proficient children (sampled from grade 3 and beyond) for whom we used a consistent 250-ms presentation duration. Prior to analyzing RTs, we applied a log transformation to bring the data in line with the normality assumption.

---

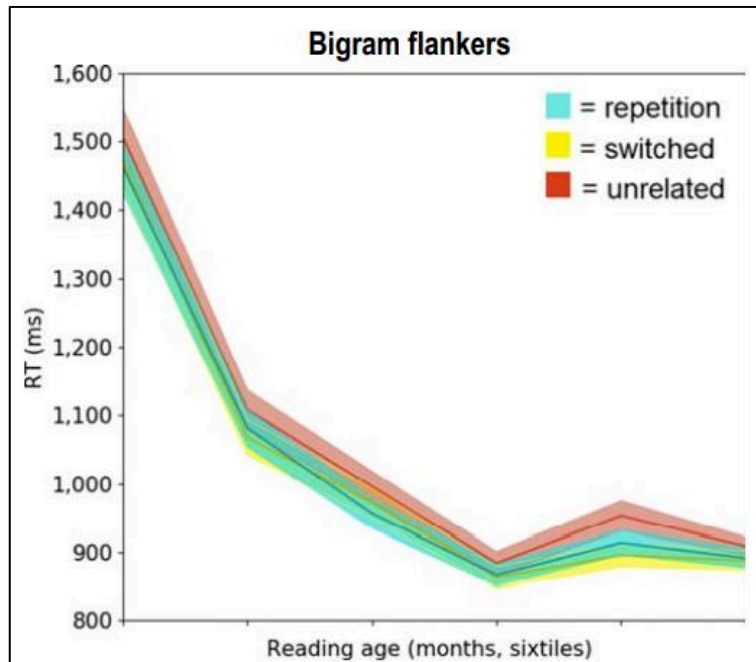
<sup>1</sup> Note that no effects of flanker relatedness were found in the pseudoword trials: contrasting repetition versus unrelated bigram flankers,  $b = 0.004$ ,  $SE = 0.01$ ,  $t = 1.20$ ; contrasting repetition versus unrelated whole-word flankers,  $b = 0.01$ ,  $SE = 0.01$ ,  $t = 1.39$ .

## Bigram flankers

Figure 2 shows raw RTs for the bigram flanker conditions across the proficiency range. Note that although Figs. 2 and 3 show raw RTs for illustrational purposes, statistical analyses were performed on log-transformed RTs.

We observed a main effect of Reading Age, with better performance of more proficient participants (RTs:  $b = -0.006$ ,  $SE = 0.001$ ,  $t = -5.65$ ; errors:  $b = -0.02$ ,  $SE = 0.004$ ,  $z = -6.22$ ). Replicating findings from previous research, the flankers also had a significant effect on performance, with repetition flankers yielding faster responses than unrelated flankers ( $b = -0.04$ ,  $SE = 0.001$ ,  $t = -4.29$ ) and fewer errors ( $b = -0.44$ ,  $SE = 0.08$ ,  $z = -5.30$ ). Like the intact-order flankers, the switched flanker condition yielded faster responses than the unrelated flanker condition ( $b = -0.04$ ,  $SE = 0.01$ ,  $t = -4.56$ ) and fewer errors ( $b = -0.17$ ,  $SE = 0.08$ ,  $z = -2.09$ ). No difference in RT was observed between the intact and switched flanker conditions ( $b = 0.01$ ,  $SE = 0.01$ ,  $t = 0.86$ ), although fewer errors were made in the presence of intact flankers compared to switched flankers ( $b = -0.27$ ,  $SE = 0.08$ ,  $z = -3.24$ ).

Of crucial importance to the central question of this paper –whether attention extends beyond single words in beginning readers – is the fact that effects of Flanker Relatedness were also present in the youngest, least proficient children. Isolating the 20 least proficient participants and contrasting repetition versus unrelated flankers, we observed a marginally significant effect in RTs ( $b = 0.05$ ,  $SE = 0.03$ ,  $t = 1.95$ ) and a significant effect in errors ( $b = 0.55$ ,  $SE = 0.17$ ,  $z = 3.25$ ).



**Fig. 2** Average response times (RTs) for the bigram flanker conditions as modulated by reading age. Data were divided into six quantiles, sorted by reading age (least to most proficient). Shaded areas around the curves depict standard errors. Note that RTs in the repetition (blue) and switched (yellow) conditions largely overlap

Reading age was not found to modulate the flanker effect, both when analyzing the entire sample (RTs,  $b = 3 \times 10^{-4}$ ,  $SE = 4 \times 10^{-4}$ ,  $t = 0.62$ ; in errors,  $b = 0.006$ ,  $SE = 0.004$ ,  $z = 1.37$ ) and when analyzing the subset of children for whom we used consistent 250-ms stimulus durations ( $N = 69$ ; RTs,  $b = 3 \times 10^{-4}$ ,  $SE = 6 \times 10^{-4}$ ,  $t = 0.50$ ; errors,  $b = 0.006$ ,  $SE = 0.007$ ,  $z = 0.94$ ).

### Whole-word-flankers

Figure 3 shows raw RTs for the two whole-word flanker conditions (repetition vs. unrelated) and the no-flanker condition. The main effect of reading age was again expressed both in log-transformed RT scores ( $b = -0.006$ ,  $SE = 0.001$ ,  $t = -5.65$ ) and in errors ( $b = -0.02$ ,  $SE = 0.003$ ,  $z = -6.09$ ). Compared to repetition flankers, responses were again slowed by

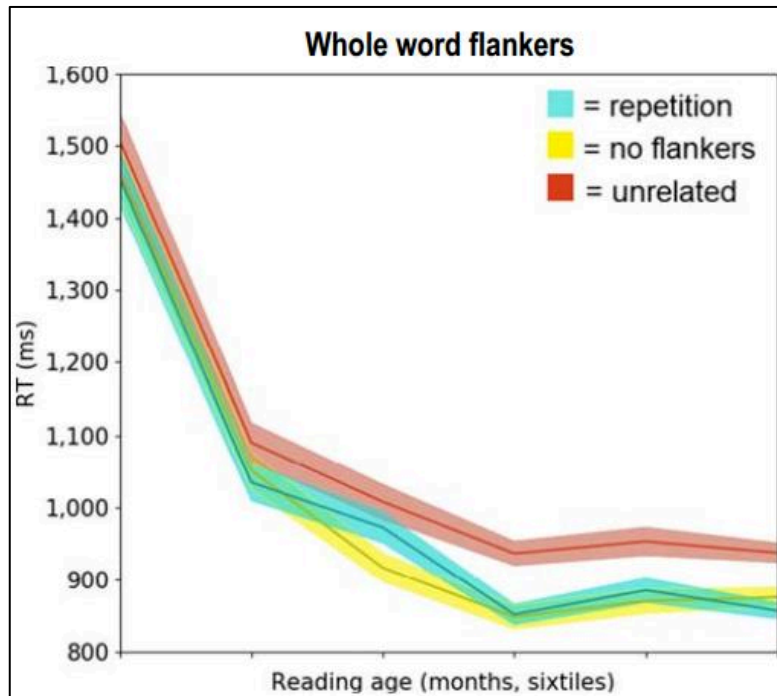
unrelated flankers,  $b = 0.07$ ,  $SE = 0.008$ ,  $t = 8.62$ . This difference was also expressed in the error rate,  $b = 0.37$ ,  $SE = 0.08$ ,  $z = 4.41$ .

The no-flanker condition yielded better performance than repetition flankers (RTs:  $b = -0.12$ ,  $SE = 0.05$ ,  $t = -2.55$ ; errors:  $b = 0.07$ ,  $SE = 0.09$ ,  $z = 0.75$ ) and than unrelated flankers (RTs:  $b = -0.18$ ,  $SE = 0.05$ ,  $t = -3.61$ ; errors:  $b = -0.31$ ,  $SE = 0.08$ ,  $z = -3.65$ ).

Isolating the 20 least proficient readers, we again observed effects of flanker relatedness in the two whole-word flanker conditions (repetition vs. unrelated): RTs:  $b = 0.07$ ,  $SE = 0.03$ ,  $t = 2.81$ ; errors:  $b = 0.33$ ,  $SE = 0.17$ ,  $z = 1.89$ . Similar to our observations for bigram flankers, reading age was not found to modulate whole-word flanker effects, both when analyzing the entire sample (RTs:  $b = 2 \times 10^{-4}$ ,  $SE = 4 \times 10^{-4}$ ,  $t = 0.37$ ; errors:  $b = 0.004$ ,  $SE = 0.004$ ,  $z = 0.85$ ), and when isolating the 69 readers from grade 3 and beyond (RTs:  $b = 4 \times 10^{-4}$ ,  $SE = 6 \times 10^{-4}$ ,  $t = 0.72$ ; errors:  $b = 0.004$ ,  $SE = 0.007$ ,  $z = -0.49$ ).

As noted in the *Introduction*, the no-flanker condition allowed us to investigate whether the impact of the presence of surrounding stimuli per se is modulated by reading experience. With the no-flanker condition as reference, a contrast against the repetition flanker condition revealed a significant interaction between Flanker Presence and Reading Age, whereby the adverse effect of the presence of flankers, as reflected in RTs, diminished with increasing reading experience,  $b = -0.001$ ,  $SE = 4 \times 10^{-4}$ ,  $t = -2.26$ . This effect was not reflected in the error rate, however ( $b = 0.006$ ,  $SE = 0.005$ ,  $z = 1.36$ ). A marginally significant interaction between Flanker Presence and Reading Age was observed in RTs when isolating the no-flanker and unrelated flanker conditions (RTs:  $b = 0.001$ ,  $SE = 4 \times 10^{-4}$ ,  $t = -1.85$ ; errors:  $b = 0.002$ ,  $SE = 0.004$ ,  $z = 0.58$ ).





**Fig. 3** Average response times (RTs) for the whole-word and no-flanker conditions as modulated by reading age. Data were divided into six quantiles, sorted by reading age (least to most proficient). Shaded areas around the curves depict standard errors

Lastly, we investigated whether differences in word familiarity across our population sample (older children being more familiar with certain stimuli than younger children) may have contributed to our effects. If this were indeed possible, then our key effect of orthographic overlap should similarly be modulated by word frequency in all participants. Re-running our model with log-frequency added as a variable alongside our condition factor, we established a main effect of frequency with better overall performance for highly frequent words (RTs:  $b = -4.87 \times 10^{-5}$ ,  $SE = 1.73 \times 10^{-5}$ ,  $t = -2.82$ , errors:  $b = -2.28 \times 10^{-4}$ ,  $SE = 9.27 \times 10^{-5}$ ,  $z = -2.46$ ), but, importantly, no interaction between frequency and flanker relatedness (RTs:  $b = 5.31 \times 10^{-6}$ ,  $SE = 1.75 \times 10^{-5}$ ,  $t = 0.30$ ; errors:  $b = 1.36 \times 10^{-4}$ ,  $SE = 1.07 \times 10^{-4}$ ,  $z = 1.27$ ). We therefore deduce that differences in word familiarity across participants need not be taken

into account in the interpretation of (the absence of) interactions between flanker relatedness and reading age.

## **Discussion**

While it has been generally assumed that the processing span is smaller in beginning readers (Ans et al., 1998; Khelifi et al., 2017; Rayner, 1998), an aggregate of various lines of research suggests that this assumption is subject to some theoretical ambiguity. Specifically, whereas some studies point to a reduced visual processing span in beginning readers (*e.g.*, Khelifi et al., 2017; Kwon et al., 2007), other studies suggest that the span of visual processing is more or less stable across the course of reading development, and that it is instead linguistic factors that determine how much information the beginning reader can process within a given interval (*e.g.*, Blythe et al., 2009; Rayner, 1986). Aiming to clarify matters, in the present study we used a flanker paradigm combined with the lexical decision task in order to determine the attentional distribution in beginning readers.

Previous research has shown that orthographic spatial integration effects, whereby words are recognized faster when surrounded by related than by unrelated letters (Dare & Shillcock, 2013; Inhoff et al., 2000; Snell et al., 2017, 2018a, 2018b), are driven by attention (Snell et al., 2018c, 2019; Snell & Grainger, 2018). The fact that such effects are robustly observable in adult readers suggests that attention extends beyond single words in this population. We invoked the same logic in the present study: if the attentional distribution is confined to single letters (or at least single words) at the start of reading development, and widens as a function of reading experience, then this should be reflected in an onset of flanker

relatedness effects sometime along the course of reading development – here examined in readers from grades 1–6.

The results of this study are quite unlike our prior expectations: effects of flanker relatedness were observed in the youngest, least proficient readers, and did not change through increased reading proficiency. Crucially, the stimulus durations used in each respective grade were barely sufficient to recognize single words (*e.g.*, Seabra et al., 2017), which indicates that the flanking stimuli were processed in parallel with the target<sup>2</sup>. These findings compel us to claim that attention extends beyond single words in the youngest readers.

We also established interaction effects between reading experience and flanker presence, with the adverse effect of the presence of surrounding stimuli decreasing as experience increases. This pattern is best understood in light of the recent study of Snell and Grainger (2018), who found that surrounding stimuli affect word processing in at least two ways: firstly, through the spatial integration of orthographic information, and secondly, through bottom-up capture of covert attention (hence drawing some resources away from target word processing). The core principle is that bottom-up attentional shifts are caused by onsets at relatively limitedly attended locations. For instance, when the attentional gradient

---

<sup>2</sup> Given the absence of eye-position measurements in the present study, one may be compelled to contend that children could have fixated the flankers as well as the target, and that therefore these effects weren't driven by widespread attention but rather by very rapid serial processing. However, this is very unlikely: our prior research has shown that readers do not move their eyes to the flankers when the presentation duration is shorter than the average fixation duration (Snell et al., 2018c). Rayner (1986) established that fixation durations in beginning readers are well over 300 ms, and a later study of Tiffin-Richards and Schroeder (2015a) measured an average single fixation duration of 348 ms for short, high-frequency words in a large sample of second-grade children. Children thus had insufficient time to execute multiple fixations in the present study. Alternatively, one may argue that effects were caused by children fixating flankers *instead of* – rather than in addition to – the target. But this does not hold either: the flankers could not have yielded an effect of orthographic overlap without concurrent processing of the target.

is skewed to the right, a visual onset in the left hemifield would cause an attentional shift, whereas a visual onset in the right hemifield would leave the attentional distribution relatively unaltered (for the location was already abundantly attended). Attentional capture, in this sense, is not characterized by the migration of all attentional resources to a single location, but rather by a shift in the skew of the attentional distribution. Hence, even if a leftward flanker captures attention, the rightward flanker and target may continue to be processed (*e.g.*, Snell & Grainger, 2018). In the currently tested population, the younger readers may have allocated fewer processing resources to the parafovea (though enough resources were allocated there to process the flankers orthographically), resulting in stronger capture effects.

Our key finding, that beginning readers allocate attention to surrounding words, is at apparent odds with previous claims that attention is more narrowly distributed in less proficient readers (*e.g.*, Bosse, Tainturier, & Valdois, 2007; Bosse & Valdois, 2009). In these studies, the attentional distribution was gauged by means of briefly presenting random five letter strings and asking participants to recall, after stimulus offset, either the whole string or single letters at post-cued locations. However, as has previously been argued by Goswami (2015), it is not clear whether worse performance in such a task can be taken as evidence for an atypical attentional distribution. In the case of recalling entire strings, for instance, task performance is equally likely to depend on short-term and/or working memory (see also, *e.g.*, Hachmann, Bogaerts, Szmalec, Woumans, Duyck, & Job, 2014). Additionally, less proficient readers may have atypical perceptual load thresholds for reasons other than attention (see White, Boynton, & Yeatman, 2019a, for a thorough attempt to dissociate between attentional and non-attentional factors).

With respect to the recall of single letters, it is important to note that the field has produced mixed evidence. Notably, Geiger et al. (2008) observed better recognition of single letters in peripheral vision in dyslexic readers compared to non-dyslexic readers – a finding that would, if anything, be indicative of a widened attentional distribution more so than a narrowed distribution. Along the same lines, Banfi, Kemény, Gangl, Shulte-Körne, Moll, and Landerl (2018) did not find differences in the visual attention span between dyslexic and non-dyslexic readers when controlling for phonological short-term memory. Generally, then, one may be compelled to conclude that reduced reading proficiency need not be contingent on a narrow processing span; and the present results attest to this conception.

On a methodological note, a shortcoming of the present study is that the presentation durations were crudely chosen based on grade (specifically, 300 ms for readers in grades 1 and 2 (N = 44), and 250 ms for readers in grades 3, 4, 5, and 6 (N = 69)) rather than on the individual participant's reading proficiency. It is therefore possible that task difficulty varied across participants within grades. Although this does not undermine the main finding of the present study – orthographic spatial integration effects in early developing readers – we nonetheless want to make note of more elegant ways to avoid cross-subject variance in task difficulty – for instance, White et al. (2019a) recently implemented a staircase paradigm that adapted task difficulty to individual readers, thereby allowing them to dissociate between visual processing factors and attentional factors. Nevertheless, in our study reading age was consistently not found to modulate the effect of flanker relatedness, both when analyzing the entire sample and when analyzing the participants from grade 3 and beyond (hence avoiding the potential confound caused by varying stimulus durations). This suggests that the attentional distribution does not change along the course of reading development.

It may also be argued that the use of post-masks (*e.g.*, presenting hashmarks at the locations of stimuli after stimulus offset) would provide stronger evidence for parallel processing of words (see, *e.g.*, discussion in Snell & Grainger, 2019b; White, Boynton, & Yeatman, 2019b). Without masking, our participants might in theory have appealed to sensory and/or short-term memory buffers to process the flankers after stimulus offset. We are nevertheless of the opinion that our flanker effects – whether reliant on direct visual processes or sensory memory – provide evidence that flankers were processed while target word recognition was still ongoing. We therefore maintain that attention must be widely distributed during reading.

Certainly the present findings do not cast doubt over the existence of a processing bottleneck in developing readers, duly evidenced by shorter saccades and longer word-viewing times in this population compared to skilled readers (Rayner, 1986). Our findings do suggest, however, that the locus of this bottleneck is at a late cognitive stage, *i.e.*, a stage beyond the level of sub-lexical orthographic processing. Thus, if there is truth to the claim that young readers have slower access to letter and word codes (*e.g.*, Jackson & McClelland, 1979; Neuhaus et al., 2001), we should add that slow letter processing does not prompt sequential letter processing.

In a similar vein one may ask whether slow lexical access would necessitate sequential lexical access. Parallel word processing has long been considered controversial even for skilled adult readers (*e.g.*, Reichle, Liversedge, Pollatsek, & Rayner, 2009), although recent lines of research do provide a growing body of evidence against serial word processing (see Snell, van Leipsig, Grainger, & Meeter, 2018d, for a review). One finding of particular relevance for the present work is that target word processing in the flanker paradigm is

facilitated by semantically related flankers (compared to semantically unrelated flankers) in skilled adult readers (Snell, Declerck, & Grainger, 2018e). The fact that these effects occur in the absence of any orthographic similarity across targets and flankers, and while employing brief stimulus durations, suggests that lexico-semantic processing can in principle occur for multiple words in parallel in skilled readers. A future line of research that will bear much prominence, therefore, consists of testing beginning readers in a flanker paradigm that manipulates the semantic relatedness of flankers. If there indeed exists a processing bottleneck that allows for only one word to be activated at once in beginning readers, then we should observe no effects of semantic flanker relatedness in this population. We take note here of closely related work by Veldre and Andrews (2015), who found that, in sentence reading, the depth of parafoveal processing (sub-lexical vs. lexical), was modulated by reading proficiency in an adult population sample.

Lastly, although previous research has thus far shown that orthographic parafoveal-on-foveal effects in the flanker paradigm are analogous to those observed in natural sentence reading (Dare & Shillcock, 2013; Snell & Grainger, 2018; Snell et al., 2017), and that inferences about visuo-spatial attention as established in one paradigm may therefore apply to the other, it would be worthwhile to test the present population in a sentence-reading paradigm as well. Current observations lead us to predict that the speed of recognizing a word during sentence reading will be impacted by its orthographic relatedness to the upcoming word, even in the youngest readers. Note that, in this regard, relevant studies have already been conducted by Tiffin-Richards and Schroeder (2015b) and Pagán, Blythe, and Liversedge (2016). In samples of 8- to 9-year-old readers, Pagán et al. (2016) and Tiffin-Richards and Schroeder (2015b) observed that reading was disrupted if an upcoming

(parafoveal) word contained a pair of transposed letters (*e.g.*, *tsep*, which would be replaced by *step* once the eyes moved to the word). This suggests, in line with our own results, that orthographic processing extends beyond single words in beginning readers.

In conclusion, our results provide evidence that the span of orthographic processing, driven by attention, is not contingent on reading experience. Instead, attention extends beyond single words even in the earliest stages of reading development.

**Acknowledgements** This research was supported by the European Research Council (grant ERC742141 awarded to Jonathan Grainger), the French national research agency (ANR, grant 15-CE33-0002-01), and the European Commission (grant H2020-MSCA-IF-2018 833223 awarded to Joshua Snell). The authors thank the schools, children and caregivers for their participation in this study.

**Open Practices Statement** All data are available at <https://osf.io/9jkt6/>



### 4.3 Conclusion Chapitre 4

À notre connaissance, cette étude est la seule à s'être intéressée aux effets d'intégration de l'information orthographique chez l'enfant en utilisant la Flankers Task. Grâce à ce travail, nous avons pu recueillir les premières données sur le *flanker effect* chez l'élève de primaire et de collègue. Il constitue une base sur laquelle se sont appuyées nos études suivantes.

Nos résultats montrent que les effets de la relation orthographique en parafovée sont observés très tôt chez l'enfant, après seulement un an d'apprentissage de la lecture pour de petites unités de deux lettres, les bigrammes de début et de fin de mot. La principale conclusion que l'on peut tirer de nos résultats est que les plus jeunes lecteurs sont capables d'extraire les informations au-delà du mot fixé. Pour les apprentis-lecteurs de 1<sup>ère</sup> année, seuls les bigrammes sont traités en parafovée.

En résumé, notre étude montre que l'attention peut être répartie sur plusieurs mots très tôt dans le développement des acquisitions nécessaires à la lecture. Conformément au cadre théorique posé par Snell et Grainger (2019a), nous pouvons supposer que les lettres sont encodées en fonction de leur position relative et non pas absolue au cours du traitement parallèle des flankers et du mot cible chez l'enfant. Ce dernier point rejoint les conclusions récentes tirées par Milledge et al. (2021) selon lesquelles le traitement effectué sur les mots en parafovée relèverait d'un traitement flexible, abondant dans le sens d'un système de codage de la position relative des lettres dans le mot (voir chapitre 3).

## **Chapitre 5 – Etude 3 : Une perspective développementale du traitement de la morphologie dans la flankers task**

### **5.1 Positionnement théorique**

De nombreux travaux ont montré que les processus cognitifs impliqués dans le traitement du mot écrit sont sensibles à sa structure morphologique (*e.g.*, Forster & Davis, 1984 ; Grainger et al., 1991 ; pour des études chez l'adulte ; Rastle, 2019 ; Quemart et al., 2011 ; pour des études chez l'enfant). Les résultats des études en amorçage masqué chez des enfants de 3<sup>ème</sup> et de 5<sup>ème</sup> année ont mis en évidence que la reconnaissance du mot est facilitée par la relation morphologique entre l'amorce et le mot cible (Beyersmann et al., 2012). Plus récemment, Grainger et al. (2020) ont étudié les effets de la morphologie en utilisant la Flankers Task auprès de participants adultes. Les auteurs ont comparé trois conditions de relations entre les flankers et le mot cible : une condition de morphologie transparente (ferme fermier ferme), une condition de morphologie pseudo-transparente (foule foulard foule) et une condition de non-morphologie (four fourmi four). Les résultats ont montré que la condition de morphologie transparente (ferme fermier ferme) facilite le traitement du mot cible par rapport aux conditions de pseudo-morphologie (foule foulard foule) et de non-morphologie (four fourmi four). Ces résultats ont mis en évidence que les processus de décomposition morphologique interviennent lors du traitement de plusieurs mots chez l'adulte.

Notre étude menée chez des élèves de primaire et chez des adultes a cherché à évaluer l'impact de flankers reliés morphologiquement au mot cible comparativement à des flankers reliés orthographiquement. Nous avons manipulé des racines de mots et leur dérivés suffixés

à travers huit conditions expérimentales : deux conditions "contrôles racines" dans lesquelles les flankers et le mot cible étaient des racines qui pouvaient être répétées (ami ami ami) ou non-répétées (son ami son) ; deux conditions "contrôles suffixées" dans lesquelles les flankers et le mot cible étaient des suffixés répétés (amitié amitié amitié) ou non répétés (sonore amitié sonore) ; une condition "morphologique racine" où la cible était la racine et les flankers étaient des suffixés (amitié ami amitié), comparativement à la condition non-reliée (sonore ami sonore) ; une condition "morphologique suffixe" où la cible était le suffixe et les flankers étaient des racines (ami amitié ami) comparativement à la condition non-reliée (son amitié son).

Selon les résultats des recherches précédentes, nous nous attendions à observer chez les adultes un effet de facilitation du lien morphologique entre les flankers et le mot cible. Concernant les enfants, la présente étude s'est concentrée sur les liens entre les effets morphologiques et le niveau d'apprentissage, qui devaient révéler des changements dans l'efficacité avec laquelle l'information morphologique est intégrée dans un contexte impliquant l'identification de plusieurs mots alignés.

## **5.2 A developmental perspective on morphological processing in the flankers task**

Christophe Cauchi, Elisabeth Beyersmann, Bernard Lété, & Jonathan Grainger

*Journal of Experimental Child Psychology, 2022, Volume 221, 1-15 [105448]*

Copyright: The Author(s) 2022

<https://doi.org/10.1016/j.jecp.2022.105448>

Soumis le 25 juin 2021, Accepté le 5 avril 2022

## **Abstract**

Recent research with adult participants using the flankers task has shown that the recognition of central target words is facilitated by the presence of morphologically related flanker words. Here we explored the development of such morphological flanker effects in two groups of primary school children (average age 8 years 6 months, and 10 years 3 months) and a group of adult participants. We examined effects of a transparent morphological relation in two conditions. One where the target was the stem and flankers were derivations (*e.g., farmer farm farmer*), and the other where the flankers were stems and the target was the derived form (*e.g., farm farmer farm*). Morphological flanker effects were compared with repetition flanker effects with the same set of stimuli (*e.g., farm farm farm; farmer farmer farmer*), and effects of related flankers were contrasted with the appropriate unrelated flankers. Results revealed no significant effect of morphological relatedness in the two groups of children, and a significant effect in the adult group, but only for suffixed targets and stem flankers. Repetition effects for stem targets were found across all groups, whereas repetition effects for suffixed targets were only found in the older children and adults. These results show that morphological processing, in a context involving multiple words presented simultaneously, takes several years to develop, and that morphological complexity (stem vs. derived) is a limiting factor for repetition effects in the flankers task with young children.

## Introduction

How the morphological structure of words influences reading has been widely debated over the past few decades (see Amenta and Crepaldi; 2012, Rastle and Davis, 2008, for reviews). Although contested by some, the consensus that has emerged from this research is that morphological structure does have a considerable impact on reading behavior, over and above purely form-based and semantic effects (*e.g.*, Beyersmann et al., 2016; Grainger et al., 1991; Longtin et al., 2003; Rastle et al., 2004). Much evidence in favor of this consensus has been obtained using the masked priming paradigm combined with the lexical decision task with adult participants (Forster and Davis, 1984; see Grainger et al., 1991, for an early investigation of morphological processing using this paradigm). In the present study we break with this tradition in two ways. First, by examining the spatial integration of morphological information across multiple words presented simultaneously, as opposed to the temporal integration of morphological information using priming. Second, by investigating the developmental trajectory of these processes in two groups of primary school children as well as a group of adults.

### *The reading version of the flankers task*

The methodological shift to studying word recognition in multi-word contexts was motivated by the need to connect single word recognition research with sentence reading research (Grainger et al., 2016). One particularly important study in this respect was performed by Dare and Shillcock (2013). They adapted the flankers task, initially applied to study attentional influences on object identification (including letters and digits – see Eriksen, 1995), to investigate the influence of orthographic flankers on the processing of

central target words. Flankers consisted of two letters placed to the left and to the right of the central target and separated by a single space. Target and flanker stimuli were presented simultaneously for 170 ms. The flanker letters could either be related (*e.g., ro rock ck*) or unrelated (*e.g., pa rock th*) to the target word. Dare and Shillcock found facilitatory effects of related flankers, and crucially, reported the same amount of facilitation even when the order to flankers was reversed (*e.g., ck rock ro*). Grainger et al. (2014) replicated these important findings and provided a theoretical framework for their interpretation couched in terms of parallel orthographic processing spanning several spatially distinct orthographic stimuli and the spatial integration of this information into a single processing channel for word identification.

Since the seminal work of Dare and Shillcock (2013), the flankers task has been used to investigate the processing of phonological (Cauchi et al., 2020), syntactic (Snell et al., 2017), and semantic information (Snell et al., 2018e) during reading. Two prior studies are of particular relevance for the present work. One by Snell et al. (2021) investigating orthographic flanker effects in primary school children through grades 1-5 and in students in their 1<sup>st</sup> year of secondary education. The same conditions as Dare and Shillcock were tested as well as a repeated (vs. unrelated word) flanker condition (*e.g., rock rock rock vs. farm rock farm*). The key finding of that study was that facilitatory flanker effects were present even in the youngest readers that were tested. The other relevant study was by Grainger et al. (2021) investigating morphological flanker effects in adult readers. Targets were either semantically transparent derived words (*e.g., farmer*), words with a pseudo-morphological structure (*e.g., corner*), and morphologically simple words with a left edge-aligned embedded word (*e.g., cashew*). Flankers were the stem (*e.g., farm*), pseudo-stem (*e.g.,*

*corn*), or embedded word (*e.g., cash*), and effects of these related flankers were compared with matched unrelated word flankers. Related flankers were found to facilitate central target word recognition in all conditions, but significantly more so when there was a transparent morphological relation between targets and flankers (*e.g., farm farmer farm*). The present work builds on these two prior studies by investigating effects of morphologically related flankers during reading development.

### *Morphological processing and reading development*

Despite the widely recognized importance of morphological knowledge in children's reading development (*e.g., Rastle, 2018*), the dynamics of morphological processing in children are still not well understood. Compared to the large body of research on morphological processing in adults, findings obtained with the masked priming paradigm from developing readers are sparser and more variable across languages (*e.g., Beyersmann et al., 2012; Beyersmann et al., 2015; Beyersmann et al., 2021; Dawson et al., 2021; Lázaro et al., 2018; Quémart et al., 2011; Schiff et al., 2012*). A masked priming study with English-speaking third and fifth graders (Beyersmann et al., 2012) reported significant priming effects with semantically transparent (*e.g., farmer-farm*) but not opaque complex words (*e.g., corner-corn*), suggesting that English-speaking primary school children have not yet acquired the same level of automatization of form-based morphological processing that is typically seen in adults. Similarly, results from Hebrew- and Spanish speaking children show that opaque morphological priming is absent in fourth and fifth graders, but present in sixth and seventh graders, indicating that form-based morphological processing is not acquired until the start of high school (Lázaro et al., 2018; Schiff et al., 2012). In contrast, Quémart et al. (2011) reported an earlier onset of morphological form priming in French-speaking third,



fifth, and seventh graders, suggesting that French-speaking children acquire morpho-orthographic decomposition mechanisms earlier in reading development than English, Hebrew, and Spanish speaking children. This claim finds further support from a recent study by Beyersmann and colleagues (2021) investigating the developmental trajectory of morphological processing in two large cohorts of German and French speaking primary schoolers, who found that form-based morphological segmentation mechanisms appear to be acquired sooner in French than in German.

### *The present study*

Given the variability in results obtained with the masked priming paradigm as concerns the developmental time-course of morphological processing during reading acquisition, here we provide a new line of attack on this issue using the flankers task. Prior research with adults (Grainger et al., 2021) suggests that this paradigm is more sensitive to the processing of semantically transparent morphological relations, and therefore might well provide a better means of understanding how such processing changes as children learn to read. To examine the developmental time-course of morphological processing in French primary school children, the present study involved a large sample of 3<sup>rd</sup>, 4<sup>th</sup>, and 5<sup>th</sup> graders, as well as one group of adults. Derived targets were either accompanied by stem flankers (*e.g., farm farmer farm*) or unrelated control flankers (*e.g., bank farmer bank*). The results reported by Grainger et al. (2021) revealed robust effects of flanker relatedness in these conditions in a group of adults. Here we added a condition where targets were stems and flankers were derived words (*e.g., farmer farm farmer vs. banker farm banker*). This was added as a test of the account of morphological flanker effects proposed by Grainger et al. (2021). According to the interpretation of their findings, we expected to observe the same

flanker facilitation effect in this condition as in the derived word target – stem flanker condition in our adult participants. However, in anticipation of our results, we note that the relative length of targets and flankers is confounded in this manipulation, and that relative target-flanker length might well impact on flanker effects. Nevertheless, the focus of the present study was on differences in morphological flanker effects as a function of grade,<sup>1</sup> which were expected to reveal changes in the efficiency with which morphological information is processed and integrated in a simplified reading context. We also included a repetition flanker condition as a baseline, one with stems (*e.g., farm farm farm*), given that we know that such effects can be obtained with the youngest readers (Snell et al., 2021), and one with derived words (*e.g., farmer farmer farmer*).

## **Method**

### **Participant**

Forty adults (35 female), all students at Lyon University, France, ranging in age between 18 and 29 years (mean age = 21 years; 5 month, SD = 2 years; 6 months), gave informed consent to participate in this study. Adults were tested individually in an experimental room. In addition, a total of one hundred and thirteen children in 3<sup>rd</sup>, 4<sup>th</sup> or 5<sup>th</sup> grade were recruited from a primary school in Lyon. They were pre-tested with the Alouette reading test (Lefavrais, 1967) to ensure that their reading level was not lower than the range of reading levels associated with the respective grade. This led to the exclusion of twenty-seven children. Then we classified the remaining children into two groups based on two of

---

<sup>1</sup> Note that in the present work we focused on changes in morphological processing as a function of grade rather than reading-level, given the hypothesized importance of differences in reading instruction across grades (see Methods), and the evidence that grade-level has a bigger impact on the processing of morphologically complex words (sensitivity to affixes) than reading-level (Hasenäcker et al., 2020).

the four French teaching Cycles (Cycles 2 & 3). According to the Ministère de l'Éducation Nationale (2020), Cycle 2, referred to as "Fundamental Learning Cycle", is considered as the first stage of compulsory schooling for pupils (prior to that there is kindergarten). It covers the first three years of primary school (1<sup>st</sup> to 3<sup>rd</sup> grades, age 6-8). Children are taught the meaning of prefixes and suffixes and carry out exercises to locate and group words by morphological analogies. Cycle 3, referred to as "Consolidation Cycle", aims to reinforce the basic knowledge acquired in Cycle 2. The child is expected to reason on the basis of morphological aspects of the language. Children carry out word sense elucidation exercises and verb creation games using implicit morphological knowledge. It covers the last two years of primary school (4<sup>th</sup> and 5<sup>th</sup> grades, age 9-11) and the first year of secondary education (6<sup>th</sup> grade, age 11-12).

Following this strategy, 44 children were recruited in Cycle 2 (all in 3<sup>rd</sup> grade; mean age = 8 years; 6 months, SD = 5 months) and 42 children in Cycle 3 (10 in 4<sup>th</sup> grade and 32 in 5<sup>th</sup> grade; mean age = 10 years; 3 months, SD = 6 months). Within each Cycle, the children's reading age matched their grade's chronological age (second Cycle = 8 years; 3 months, SD = 9 months / third Cycle = 10 years; 2 months, SD = 1 year; 2 months). All participants were French native speakers with normal or corrected-to-normal vision and had no history of neurological and/or language impairment. Informed consent was provided by the participant's caregivers prior to experimentation. Ethics approval for this study was granted by the Comité de Protection des Personnes SUD-EST IV (No. 17/051).

### **Stimuli and design**

All word stimuli were selected from the MANULEX French grade-level lexical database (Lété et al., 2004). We selected root words (stems) that had a semantically transparent

suffixed derivation that were already known by grade 1 children. We built two sets of 24 pairs of words. The first set consisted of 24 stem words (*e.g.*, *danse*, [“dance”]) paired with 24 corresponding suffixed words (*e.g.*, *danseur* [“dancer”]), used as target and/or related flankers. The second set consisted of 24 stem words (*e.g.*, *toit*, [“roof”]) and 24 corresponding suffixed words (*e.g.*, *toiture*, [“roofing”]), which were orthographically, morphologically, and semantically unrelated to the stem targets of the other set, and were used as unrelated flankers. From these two sets of items, we constructed eight experimental conditions (see Table 1). Two stem-stem conditions where the target stem word was flanked by the same stem flanker (*e.g.*, *danse danse danse*) or by an unrelated stem flanker (*e.g.*, *toit danse toit*); two suffixed-suffixed conditions where the suffixed word target was flanked by the same suffixed word (*e.g.*, *danseur danseur danseur*) or by an unrelated suffixed flanker (*e.g.*, *toiture danseur toiture*); two suffixed-stem conditions where the stem word target was flanked by the corresponding suffixed word (*e.g.*, *danseur danse danseur*) or by an unrelated suffixed word (*e.g.*, *toiture danse toiture*); two stem-suffixed conditions where the suffixed word target was flanked by the corresponding stem (*e.g.*, *danse danseur danse*) or by an unrelated stem (*e.g.*, *toit danseur toit*).

Stems were three to five letters long (average = 4.21 letters) and suffixed words were five to seven letters long (average = 6.33 letters). Word frequency was transformed into Zipf values (van Heuven et al., 2014). In the first set, the stem frequency was 6.49 (range 5.70 – 7.50) and the suffixed word frequency was 5.83 (range 5.38 -6.83). In the second set, the stem frequency was 5.97 (range 5.25 – 6.79) and the suffixed word frequency was 5.28 (range 4.94 – 6.43). Pseudoword targets, associated with pseudoword flankers, were used as fillers for the purpose of the lexical decision task and were not considered in the analyses. They were

created from the two sets of words by a single letter substitution. The OLD20 values of these pseudowords (Yarkoni, et al., 2008) was 1.79 (range: 1 – 2.85).

A 2 x 2 x 2 design was retained with Target Type (stem vs. suffixed), Relation Type (repetition vs. morphological) and Relatedness (related flanker vs. unrelated flanker) as within-participant factors. The stem-stem and suffixed-suffixed conditions tested for repetition effects with related target and flankers being the same word, and the suffixed-stem and stem-suffixed conditions tested for morphological effects. For a given stem-derived pair (*e.g., ami-amitié*), each participant saw both the stem (*ami*) and the suffixed word (*amitié*) as targets, within both the related (*amitié-ami; ami-amitié*) and the unrelated (*largeur-ami; large-amitié*) flanker conditions, either in the morphological condition (see preceding examples) in one list, or in the repetition condition in a different list (*e.g., ami-ami; amitié-amitié; large-ami; largeur-amitié*). As such, each participant saw each target word twice, in both the related and the unrelated flanker conditions. There were 12 items per condition per participant. See the Appendix 3A for the complete set of word stimuli and their assignment to the two lists.

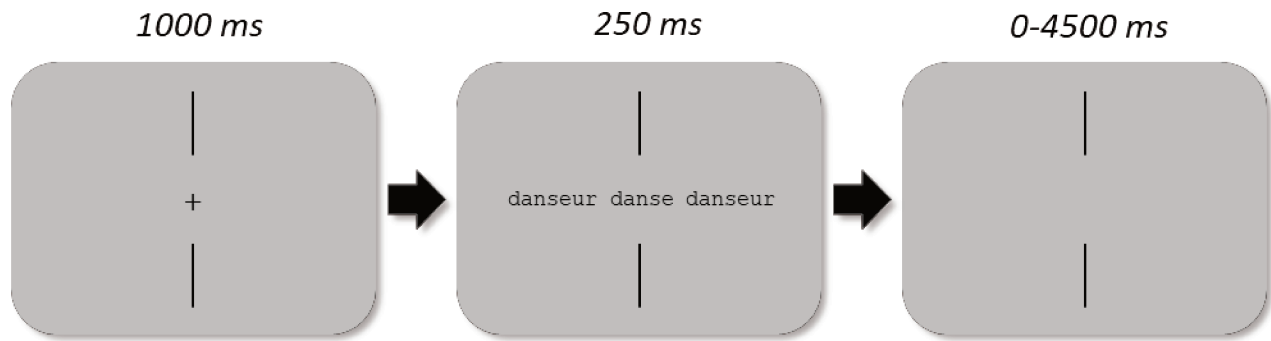
**Table 1.** Examples of target and flanker stimuli in the eight experimental conditions.

| Flanker  | Target   | Relatedness             |                         |
|----------|----------|-------------------------|-------------------------|
|          |          | related                 | unrelated               |
| stem     | stem     | danse danse danse       | toit danse toit         |
| suffixed | suffixed | danseur danseur danseur | toiture danseur toiture |
| suffixed | stem     | danseur danse danseur   | toiture danse toiture   |
| stem     | suffixed | danse danseur danse     | toit danseur toit       |

*Note.* In the example triplets, the target is the central stimulus.

## **Procedure**

The experiment was implemented with OpenSesame (Mathôt et al., 2012). Stimuli were presented on a DELL Latitude 3400 monitor calibrated in 14-inch (1,366 × 768 px, 80 Hz). They were displayed in lowercase Courier New font (21 pts) in black on a grey background. At a viewing distance of 40 cm, each character subtended approximately 0.33 degrees of visual angle. Manual responses were collected with the computer keyboard. Each trial started with two vertical fixation bars above and below a central fixation cross. After 1000 ms, the central fixation cross disappeared, and the target (a word or a pseudoword), flanked by two words or pseudowords on each side, was presented between the two vertical fixation bars (see Fig. 1). After 250 ms, the stimulus was blanked. Participants had to indicate as quickly and accurately as possible whether the target was a word or a pseudoword by pressing the right or the left button ('q' and 'm', respectively, on an AZERTY keyboard) for participants who declared that they were right-handed. It was inverted for left-handed participants. Participants had a maximum of 4500 ms to make their lexical decision. The experiment lasted between 10-15 minutes for adults and between 20-30 minutes for children. The 192 trials were divided into four blocks of 48 trials. Blocks and trials were randomized for each participant. A short break was proposed between blocks. The task began with 32 practice trials followed by the main experiment.



**Figure 1.** Illustration of the experimental procedure with an example stem target word flanked by related suffixed word flankers. The fixation cross was presented for 1000 ms, followed by the experimental items for 250 ms. Targets were centered with respect to the vertical fixation bars. After the stimuli disappeared, participants had a maximum of 4500 ms to indicate whether the central stimulus was a word or not.

### Statistical Power estimation

Statistical power was estimated *a posteriori* using the simulation approach suggested by Brysbaert and Stevens (2018). We employed the Monte Carlo method using the *powerSim* function from the *simR* package (Version 1.0.5; Green and MacLeod, 2016). The stem-stem-related vs. stem-stem-unrelated contrast was targeted in this analysis using the observed size of the Relatedness effect in RTs in the three groups of participants (35 ms in the adult group, 63 ms in Cycle 3, and 84 ms in Cycle 2). At each iteration, the program selected a random sample of items and participants from the original dataset and fitted a linear-mixed-effects model from which the statistical power was estimated 20 times. Each sample selection was constrained to retain a 75% reduced sample from the original dataset (*e.g.*, 18/24 items and 30/40 participants from the adult group dataset). Thus, the estimated statistical power was 98% in the adult group, 91% in Cycle 3 and 81% in Cycle 2. Given the standard of 80%, we reckoned to have sufficient power in this study.

## Results

Pseudoword fillers were excluded from the statistical analysis. The data were analyzed in the R statistical computing environment (R Core Team, 2018). For the RT analyses, linear mixed-effects models were fitted (Baayen, 2008) with the *lmer* function from the *lme4* package (Version 1.1–21; Bates, Maechler, Bolker, & Walker, 2014). The RT variable was log-transformed to meet normality assumptions. For the accuracy analyses, a generalized mixed-effects model was fitted with the *glmer* function from the package cited above using the same structure as the models used for RT except that the accuracy variable was used as a binomial response. The by-group analyses consisted of a full model with target type (stem or suffixed), relatedness (related or unrelated), and relation type (repetition or morphological) as fixed factors and logarithmic RT as a continuous variable in which the maximal random effects structure that converged was used (Barr, Levy, Scheepers, & Tily, 2013). Due to the complexity of the experimental design with the inclusion of group as a three-level factor, the results of such a  $2 \times 2 \times 2 \times 3$  analysis are not reported here. Instead, we report the results of analyses including group as a two-level factor (Cycle 2 vs. Cycle 3 or Cycle 3 vs. adults). The significance of the fixed effects was determined with Type III model comparisons using the *Anova* function from the *car* package (Version 3.0–8; Fox & Weisberg, 2011). Post hoc analyses were carried out to follow up the significant two-way and three-way interactions using cell means coding and single df contrasts with the *glht* function of the *multcomp* package (Version 1.4–13; Hothorn, Bretz, & Westfall, 2008) using the normal distribution to evaluate significance (see Table 2).



## By-group analyses

### Reaction times

All trials with RTs lying beyond 300 and 3000 milliseconds (Cycle 2 = 5.6%, Cycle 3 = 1.6%, adult group = 0.1%) were excluded. Incorrect responses were excluded from the RT analyses (Cycle 2 = 12.1%, Cycle 3 = 4.8%, adult group = 3.4%). In each group, a null model with a random structure including by-participant and by-item random intercepts was fitted to compute standardized residuals from the logarithmic RTs. All trials with standardized residuals larger than 2.5 in absolute value were excluded (Cycle 2 = 2.2%, Cycle 3 = 2.9%, adult group = 2.3%). Raw means for each condition and for each group are provided in Table 2.

To simplify the description of the model outputs, here we only summarize the main effect of Relatedness (factor of interest) and its interaction with Relation Type and Target Type. See Appendix 3B for the complete model outputs.

In Cycle 2, the main effect of Relatedness failed to reach significance ( $\chi^2(1) = 2.91, p = .08$ ). The 3-way interaction between Relatedness, Relation Type, and Target Type was significant ( $\chi^2(1) = 4.56, p < .05$ ). Follow-up analyses revealed that the Relatedness by Relation Type interaction was not significant for suffixed targets ( $\chi^2(1) = 0.03, p > .10$ ) but significant for stem targets ( $\chi^2(1) = 7.82, p < .01$ ). Further post-hoc comparisons (see Table 2) revealed that there was a significant effect of Relatedness only in the stem-stem (repetition) condition.

In Cycle 3, the main effect of Relatedness was significant ( $\chi^2(1) = 19.06, p < .001$ ), with faster responses in the presence of related flankers. The 3-way interaction between

Relatedness, Relation Type, and Target Type was not significant ( $\chi^2 (1) = 0.32, p > .10$ ). The Relatedness by Relation Type interaction was significant ( $\chi^2 (1) = 12.14, p < .001$ ). Follow-up analyses revealed that the Relatedness effect was significant for repetition flankers ( $\chi^2 (1) = 23.28, p < .001$ ) but not for morphological flankers ( $\chi^2 (1) = 0.38, p > .10$ ). Further post-hoc comparisons (see Table 2) revealed that there was a significant effect of Relatedness in the stem-stem and suffixed-suffixed conditions.

In the adult group, the main effect of Relatedness was significant ( $\chi^2 (1) = 33.09, p < .001$ ), with faster responses in the presence of related flankers. The 3-way interaction between Relatedness, Relation Type, and Target Type was not significant ( $\chi^2 (1) = 1.03, p > .10$ ). The Relatedness by Relation Type interaction was significant ( $\chi^2 (1) = 14.47, p < .001$ ). This interaction was driven by the greater effects of Relatedness obtained with repetition flankers ( $\chi^2 (1) = 47.03, p < .001$ ) than with morphological flankers ( $\chi^2 (1) = 9.20, p < .01$ ). As can be seen in Table 2, the reduced effect of Relatedness in the morphological condition was primarily driven by the absence of an effect with stem targets and derived word flankers.

**Table 2.** Mean RTs (in milliseconds) and accuracy (probabilities) for each condition and each participant group.

|                         | flanker  | target   | RTs / Relatedness |            | $\Delta$ (signif) | Accuracy / Relatedness |           | $\Delta$ (signif) |
|-------------------------|----------|----------|-------------------|------------|-------------------|------------------------|-----------|-------------------|
|                         |          |          | related           | unrelated  |                   | related                | unrelated |                   |
| <i>Cycle 2 (n = 44)</i> | stem     | stem     | 1104 (258)        | 1188 (283) | 84 (***)          | .92 (.09)              | .89 (.12) | .03 (*)           |
|                         | suffixed | suffixed | 1221 (308)        | 1207 (278) | -14 (ns)          | .88 (.12)              | .84 (.14) | .04 (*)           |
|                         | stem     | suffixed | 1178 (290)        | 1185 (290) | 7 (ns)            | .87 (.15)              | .82 (.16) | .05 (*)           |
|                         | suffixed | stem     | 1112 (234)        | 1113 (250) | 1 (ns)            | .91 (.11)              | .88 (.13) | .03 (ns)          |
| <i>Cycle 3 (n = 42)</i> | stem     | stem     | 846 (162)         | 909 (180)  | 63 (***)          | .96 (.07)              | .96 (.08) | .00 (ns)          |
|                         | suffixed | suffixed | 884 (165)         | 925 (178)  | 41 (***)          | .97 (.04)              | .94 (.07) | .03 (ns)          |
|                         | stem     | suffixed | 915 (204)         | 922 (177)  | 7 (ns)            | .96 (.06)              | .93 (.07) | .03 (ns)          |
|                         | suffixed | stem     | 908 (165)         | 911 (166)  | 3 (ns)            | .95 (.08)              | .94 (.10) | .01 (ns)          |
| <i>Adults (n = 40)</i>  | stem     | stem     | 594 (83)          | 629 (73)   | 35 (***)          | .97 (.04)              | .96 (.06) | .01 (ns)          |
|                         | suffixed | suffixed | 592 (81)          | 633 (85)   | 41 (***)          | .96 (.05)              | .97 (.05) | -.01 (ns)         |
|                         | stem     | suffixed | 609 (87)          | 632 (85)   | 23 (***)          | .97 (.06)              | .96 (.05) | .01 (ns)          |
|                         | suffixed | stem     | 622 (85)          | 627 (76)   | 5 (ns)            | .97 (.05)              | .96 (.05) | .01 (ns)          |

Note. Standard deviations are presented between parentheses. Relatedness effects (unrelated minus related) and their significance (between parentheses) are provided after the condition means of the Relatedness factor. Significance levels: \*\*\*  $p < .001$ , \*\*  $p < .01$ , \*  $p < .05$  and ns  $p > .10$

### Accuracy

Condition means for accuracy are provided in Table 2. In Cycle 2, the main effect of Relatedness was significant ( $\chi^2(1) = 15.72, p < .001$ ), with higher accuracy in the presence of related flankers compared to unrelated flankers. No significant interactions were found.

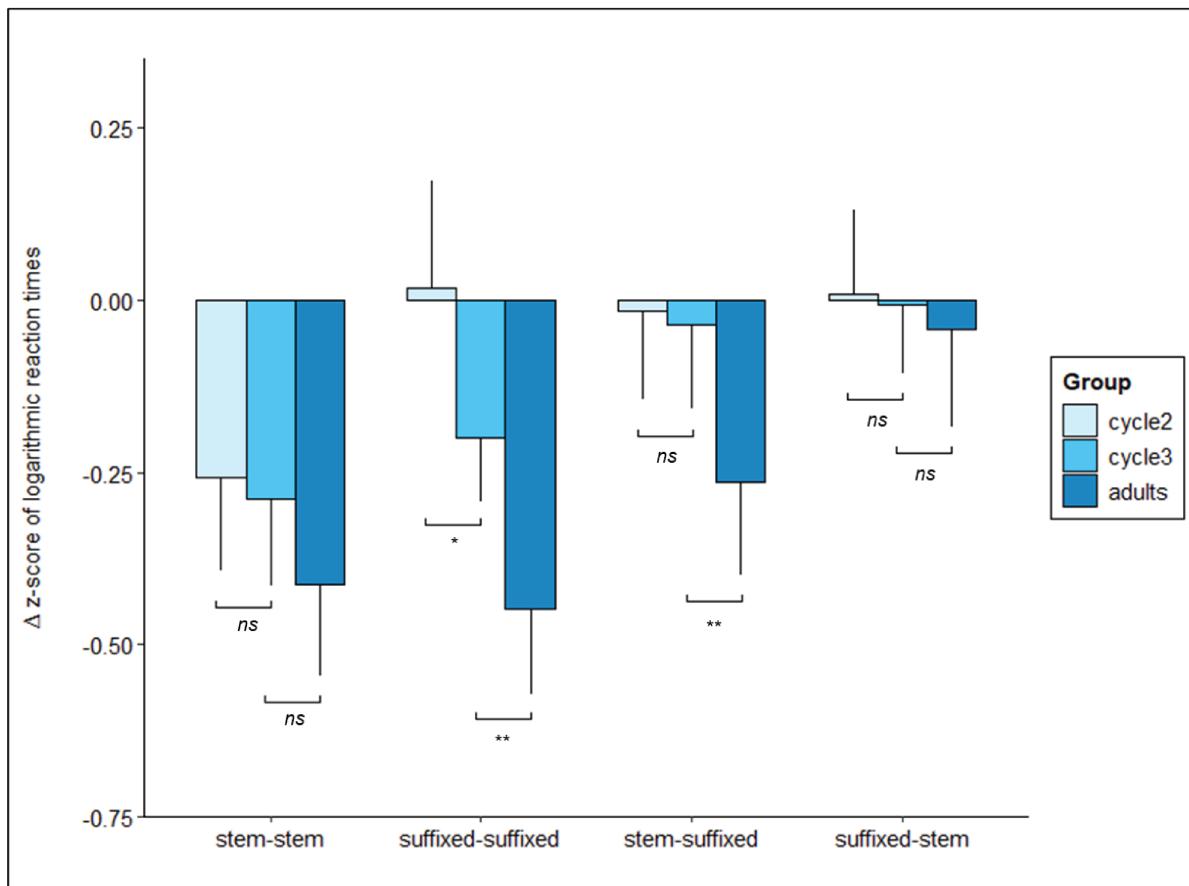
There were no significant effects of accuracy in the Cycle 3 and Adult groups.

## Between-group analyses of RTs

The goal of these analyses was to study the evolution of the different flanker relatedness effects from children to adults. In order to avoid over-additive effects due to differences in average RT across groups (Faust et al., 1999), the raw logarithmic RT data of each participant were standardized using a z-score transformation (see Lété and Fayol, 2013; Ziegler et al., 2014), such that each participant had a mean of zero and a standard deviation equal to 1 across conditions. These analyses consisted of a model including Relatedness (related, unrelated) as a within-participant factor, Group (Cycle 2, Cycle 3, Adults) as a between-participant factor and the z-score of the logarithmic RT as dependent variable. In this section we report the main effect of Group and the critical Relatedness by Group interaction tested in each of the four conditions formed by the combination of Relation Type and Target Type (stem-stem, suffixed-suffixed, suffixed-stem, stem-suffixed). The differences between the two Relatedness levels (*i.e.*, effects of flanker relatedness) expressed in z-score differences are plotted in Figure 2.

In the stem-stem condition, the main effect of Group was not significant ( $\chi^2(2) = 2.44$ ,  $p > .10$ ), and neither was the Relatedness by Group interaction ( $\chi^2(2) = 3.52$ ,  $p > .10$ ). In the suffixed-suffixed condition, the main effect of Group was significant ( $\chi^2(2) = 17.54$ ,  $p < .001$ ), and the Relatedness by Group interaction was significant ( $\chi^2(2) = 22.69$ ,  $p < .001$ ). As can be seen in Figure 2, the interaction was due to an increase in the effects of Relatedness with increasing age. In the suffixed-stem condition, the main effect of Group was significant ( $\chi^2(2) = 24.08$ ,  $p < .001$ ). However, the Relatedness by Group interaction was not significant ( $\chi^2(2) = 0.34$ ,  $p > .10$ ). Referring back to Table 2, we note the absence of a significant effect of Relatedness in this condition for all groups. In the stem-suffixed condition, the main effect of

Group was not significant ( $\chi^2 (2) = 2.88, p > .10$ ), but the Relatedness by Group interaction was significant ( $\chi^2 (2) = 10.00, p < .01$ ). As shown in Figure 2, this interaction was due to the increase in Relatedness effects with age, particularly between Cycle 3 and Adults. Indeed, as can be seen in Table 2, the effects of Relatedness in the stem-flanker, suffixed-target condition were only significant in the adult group.



**Figure 2.** Differences ( $\Delta$ ) expressed in z-score values between the two Relatedness levels (related, unrelated) for each condition (stem flanker - stem target; suffixed flanker - suffixed target; stem flanker - suffixed target; suffixed flanker - stem target) and in each group. Significance brackets correspond to the Relatedness by Group interaction involving two adjacent age groups (Cycle2 vs. Cycle3; Cycles 3 vs. Adults). Significance levels: \*\*  $p < .01$ , \*  $p < .05$  and ns  $p > .10$ .

## Discussion

In the present study we investigated two types of flanker relatedness, repetition and morphological, in the flankers task in two groups of children and a group of adult participants. The study was motivated by our prior work revealing effects of orthographic relatedness in the flankers task in the youngest participants that were tested (Snell et al., 2021), and work showing effects of morphological relatedness in the flankers task in adult participants (Grainger et al., 2021). We replicated both of these findings, with flanker repetition effects for stem targets (*e.g., farm farm farm vs. bank farm bank*) already present in the youngest children, and morphological flanker effects with derived word targets (*e.g., farm farmer farm vs. bank farmer bank*) being observed in the group of adult participants, but only in that group. Repetition effects with derived word targets (*e.g., farmer farmer farmer vs. banker farmer banker*) only emerged in the older children and were significantly larger in the adult group. Moreover, the effects of morphological relatedness with stem targets (*e.g., farmer farm farmer vs. banker farm banker*) failed to reach significance in all groups of participants. The key findings emerged in RTs rather than error rates and the overall pattern is summarized in Figure 2.

There are two main conclusions to be drawn from the present findings. Firstly, that effects of flanker relatedness can be found in beginning readers, but are limited to sequences of short, morphologically simple words. Snell et al. (2021) tested short morphologically simple words and found effects of repetition flankers (as in the stem target condition of the present study) and bigram flankers (*e.g., ro rock ck vs. st rock ep*). In line with the results of Snell et al., the size of repetition flanker effects seen for the short words tested in the present work (*i.e., the stem-stem condition*) did not change significantly across the three groups of

participants we tested.<sup>2</sup> On the other hand, the repetition effects obtained with longer words (*i.e.*, the suffixed-suffixed condition) did vary significantly across the three groups of participants, with a non-significant effect in the youngest readers becoming significant in the older children, and with the largest effects seen in the adult group. This pattern of results points to a key role for stimulus length in determining flanker effects with young readers, possibly related to changes in the span of spatial attention during reading development. Moreover, it might well have been the combination of quite brief stimulus exposure durations (250 ms) along with combined target and flanker length that was the limiting factor concerning repetition flanker effects in the youngest children. Future research could independently manipulate these two factors (*i.e.*, stimulus length and stimulus duration) in order to better understand how they contribute to flanker effects in beginning readers. We return to discuss the impact of relative target-flanker length below, and whether or not this indeed reflects an impact of stimulus length as opposed to differences in the morphological status of targets and flankers.

The second main conclusion is that the morphological flanker effects reported by Grainger et al. (2021) with derived word targets and stem flankers in adult participants, an effect that was replicated in the present work, require quite some reading experience before being observable, with the effect in the oldest children tested in the present study being non-significant (7 ms; see Table 2). Crucially, as can be seen in Figure 2, the interaction between Group (Cycle 3 vs. Adults) and Relatedness was significant. This pattern suggests that the flankers task, compared with masked priming for example, might be a more sensitive

---

<sup>2</sup> We acknowledge here, and elsewhere, that any conclusions based on null effects must be taken with appropriate caution, and particularly when there are numerical differences across conditions.

measure of the later stages of development of morphological processing for reading comprehension. One key difference between the flankers task and masked priming is that the flankers task is thought to reflect the kind of spatial integration of information spanning adjacent words that occurs in normal sentence reading,<sup>3</sup> whereas masked priming reflects the temporal integration of stimuli presented at the same spatial location and is thought to be an excellent measure of basic processes involved in single word recognition (see Snell, Bertrand, Meeter, & Grainger, 2018, for a comparison of flanker and priming effects with the same stimuli). In other words, the flankers task might provide a better window on the use of morphological information for reading comprehension as opposed to single word recognition. This makes sense, given that word recognition efficiency is the skill that develops the fastest amongst the multiple skills required to become an expert reader, and might therefore be less sensitive to the linguistic skills that take more time to develop, and that might require more explicit teaching as provided in primary school education. Thus, the reason why masked priming studies have found evidence for morphological effects in French primary school children (Beyersmann et al., 2021; Quemart et al., 2011) would be that these investigations were tapping into the already automatized process of single word recognition. The flankers task, on the other hand, would be mainly sensitive to the spatial pooling of orthographic information that occurs during sentence reading (Angele et al., 2013; Dare & Shillcock, 2013; Snell et al., 2018b), as well as the rapid activation of higher-level syntactic (Snell et al., 2017) and semantic information (Snell et al., 2018e) that are necessary for

---

<sup>3</sup> Here we point readers to the seminal work of Dare and Shillcock (2013) who found the same evidence for spatial integration of orthographic information in the flankers task and in a sentence reading experiment (see also Snell & Grainger, 2019a, and associated commentaries, for a discussion on the relative merits of using artificial paradigms, such as the flankers task, to study reading). Nevertheless, we do acknowledge that the flankers task is a relatively superficial reading task, and that experiments involving more natural reading conditions are necessary in order to fully test the framework that we propose here.



computing sentence-level representations. In that sense, the flankers task may be better suited to capture higher-level reading skills that are relevant for sentence level processing. Indeed, recent research with Italian skilled readers revealed that eye-movements are affected by the semantic transparency of morphologically complex words, thus providing evidence for the early involvement of semantics in complex word processing during sentence reading (Amenta et al., 2015; Marelli and Luzatti, 2012).

One unexpected finding of the present work is the absence of an effect of morphologically related flankers in the adult participants when the targets were stems and flankers were derived words. Given the interpretation offered by Grainger et al. (2021) for the effects they found with derived word targets and stem flankers, one would have expected to observe the same pattern with the opposite manipulation of target-flanker complexity. That is, if morphological flanker effects reflect the excitatory connectivity between truly morphologically related words, such as *farm* and *farmer* (and not pseudo-morphologically related words such as *corn* and *corner*), then facilitatory effects should have also been observed with stem targets and derived word flankers. This null effect, to be interpreted with caution, nevertheless points to the need to either abandon or at least to modify the explanation offered by Grainger et al. (2021) for the morphological flanker effects they observed with adults, a point that remains to be addressed in future research.

However, it might also be that the relative length of target and flanker stimuli is playing a role here. Absolute target-flanker length (*i.e.*, the combined length of target and flanker stimuli) cannot account for this pattern since this was matched across the stem and derived word target conditions when target and flankers were morphologically related. Relative target-flanker length (*i.e.*, the difference in length between the target and flanker

words), and differing morphological status of targets and flankers, are therefore the two key candidate explanations for the absence of an effect of flanker relatedness with stem targets and derived word primes, which we now turn to discuss.

According to the differing morphological status scenario, morphological decomposition would be automatically triggered when recognizing a derived word (*e.g.*, Grainger & Beyersmann, 2017) and this process would be facilitated by the presence of related stem flankers. On the other hand, since stem targets would not undergo morphological decomposition, they would not benefit from related derived word flankers, because the targets themselves do not require morphological processing in order to be identified. So, rather than postulating bi-directional excitatory connectivity between morphologically related words, as proposed in Grainger et al. (2020), here we propose that the automatic decomposition of complex word targets (*e.g.*, *farmer*) into stem (*farm*) and affix (*\_er*) benefits from the presence of the stem as a flanker, since this will boost activation of the stem word in the central processing channel. On the other hand, complex word flankers would not be automatically decomposed into stem and affix, and therefore would have no impact on target processing over and above effects driven by the orthographic overlap between derived word and stem. In other words, there would be no connectivity between representations activated in the central processing channel, and flanker effects would result uniquely from the spatial pooling of orthographic information activated in parallel by the target and flanker stimuli.<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> It is important to note that this does not imply that morphological information is not processed in the parafovea. That assertion would be contrary to studies showing a facilitatory influence of morphologically related parafoveal previews (*e.g.*, Dann et al., 2021). We simply argue that such information is not integrated across foveal and parafoveal words during identification of the foveal word.

According to the relative target-flanker length scenario, flanker words that are shorter than target words would have a greater impact on flanker relatedness effects, possibly due to the deployment of spatial attention in this condition (*i.e.*, more attention deployed to flanker words when they are shorter than the target word). Clearly, the obvious way to put these two scenarios to test is to compare flanker effects with truly morphological (*e.g.*, *farmer-farm*), pseudo-morphological (*e.g.*, *corner-corn*), and non-morphological (*e.g.*, *cashew-cash*) stimuli with both stems (*farm*), pseudo-stems (*corn*), and embedded words (*cash*) as targets in one condition and as flankers in another condition. The morphological account predicts that differences in target-flanker length should only be observable in the truly morphological condition (and possibly to some extent in the pseudo-morphological condition), whereas the relative length account predicts that the asymmetry should be observed in all three conditions. As a first step in this endeavor, future research could investigate non-morphological flanker effects with different target-flanker lengths (*e.g.*, *cash-cashew*; *cashew-cash*) in order to elucidate the impact of relative target-flanker length on orthographic flanker effects.

In sum, in the present study we have shown the potential for the reading version of the flankers task to reveal differences in the processing of central target words as function of their morphological complexity and of participants' grade level. Although the morphological interpretation of the present findings requires further experimentation in order to rule-out a contribution of relative target-flanker length, we consider that the flankers task will provide an interesting new angle on the developmental trajectory of other types of morphological complexity, such as inflectional morphology and compounding, and across languages that differ in morphological structure.

### 5.3 Conclusion Chapitre 5

Cette étude a apporté des données supplémentaires chez l'enfant pour ce qui concerne les effets d'intégration de l'information orthographique où nous avons pu voir que les flankers mots entiers bénéficient aux traitements effectués sur le mot central dès la 3<sup>ème</sup> année d'apprentissage de la lecture. Nous pouvons noter que ce dernier résultat est compatible avec les observations de la littérature (*e.g.*, Milledge et al., 2021 ; Khelifi et al., 2015, présentées au chapitre 3). Toutefois, nous n'avons pas obtenu le même patron de résultats observé dans un paradigme d'amorçage masqué chez l'enfant. Dans ce paradigme, la relation morphologique entre une amorce et un mot cible facilite la reconnaissance de ce dernier (*e.g.*, Quemart et al., 2011 ; Beyersmann et al., 2012). En utilisant la Flankers Tasks, avec des stimuli (mot cible et amorces) alignés et présentés en même temps, nous n'avons pas pu observer d'effet de la relation morphologique chez le jeune lecteur. En revanche, chez l'adulte, la relation morphologique entre les flankers et le mot cible a favorisé l'identification du mot, en accord avec les effets observés par Grainger et al. (2021). En cela cette étude est une confirmation de l'extraction en parafovéa d'informations de plus haut niveau que le niveau orthographique chez les adultes.

## Chapitre 6 – Etude 4 : Les trajectoires de développement du biais d’asymétrie attentionnelle en lecture

### 6.1 Positionnement théorique

Dans cette quatrième étude (manuscrit soumis à *Psychonomic Bulletin & Review*), nous avons étudié le biais d’asymétrie attentionnelle vers la droite chez le lecteur débutant.

La littérature utilisant l’oculométrie dans des tâches de lecture de phrases (cf. Chapitre 3) a rapporté que l’attention est dirigée vers la droite (*i.e.*, dans le sens de la lecture), à l’intérieur de l’empan perceptif chez l’adulte et chez l’enfant dès la 2<sup>ème</sup> année d’apprentissage (*e.g.*, Rayner, 1986 ; Häikiö et al., 2009). Parallèlement, les études qui ont utilisé des tâches d’amorçage parafovéal ont rapporté des preuves convergentes quant à ce biais attentionnel chez les enfants. Les résultats de ces études ont montré que les effets des amorces parafovéales sont plus importants dans le champ visuel droit chez l’adulte (*e.g.*, Ducrot & Grainger., 2007) et chez l’enfant à partir de la 3<sup>ème</sup> année d’apprentissage (*e.g.*, Khelifi et al., 2015 ; Milledge et al., 2021).

Plus récemment, Snell et Grainger (2018) ont utilisé la Flankers Task afin de tester l’hypothèse selon laquelle les effets de la relation orthographique flankers-cible seraient plus importants dans le champ visuel droit que dans le champ visuel gauche compte tenu de cette asymétrie. Leurs résultats ont montré que l’effet de la relation orthographique dans les conditions où le mot cible était en présence de flankers uniquement à droite (\_\_\_ rock rock vs. \_\_\_ rock path) était aussi important que dans les conditions contrôles où le mot cible était en présence de flankers bilatéraux (rock rock rock vs. path rock path). En revanche, pour la

condition où le flanker apparaissait uniquement à gauche, le flanker de droite étant absent (rock rock \_\_\_ vs. path rock \_\_\_), l'effet de la relation orthographique était significativement moins important que dans les deux autres conditions.

Dans la présente étude, nous avons administré la Flankers Task à 241 enfants de la 1<sup>ère</sup> à la 5<sup>ème</sup> année d'apprentissage de la lecture, ainsi qu'à 40 adultes. Le plan factoriel était composé de trois conditions de localisation des flankers (uniquement à gauche, uniquement à droite, à gauche et à droite) et de deux conditions de relation orthographique (répétée et non répétée). Les flankers absents étaient remplacés par des dièses afin d'empêcher des focalisations de l'attention trop importante sur les flankers linguistiques. Si, comme l'ont supposé Snell et Grainger (2018), ce biais est lié à la distribution de l'attention spatiale dans le sens de la lecture, il devrait émerger avec l'expertise en lecture. Alternativement, ce biais directionnel pourrait être déterminé par une spécialisation hémisphérique innée, les structures neuronales dédiées à la lecture étant principalement situées dans l'hémisphère gauche pour la majorité des personnes (Brysbaert, 2004). Les stimuli apparaissant dans le champ visuel droit devraient donc être mieux traités que ceux apparaissant dans le champ visuel gauche.

## **6.2 On the developmental trajectory of directional biases in reading:**

### **Evidence from the flankers task**

Christophe Cauchi, Jonathan Grainger, & Bernard Lété

Soumis le 20 juin 2022

## **Abstract**

Prior research with adult participants reported a rightward bias in the reading version of the flankers task. Here we investigated the developmental trajectory of this bias. We tested two groups of French primary school children from Cycle 2 (grades 1 and 2) and Cycle 3 (grades 4 and 5) defined by the curriculum of post-kindergarten primary education in France, and one group of adult participants. In the related flanker conditions the central target word was flanked by the same word either on the left (park park #####), the right (##### park park), or on both sides (park park park). In the unrelated conditions, the repeated flanker words were replaced by a different unrelated word. In the analysis of standardized RTs, there was a three-way interaction between the three groups of participants and the impact of flanker relatedness as a function of the position of the related flankers. This three-way interaction reflected the significantly greater increase in effects of flanker relatedness between Cycle 2 and Cycle 3 for the both sides and the right positions compared with the left position. This suggests that the rightward bias is driven by attentional asymmetries that develop during the process of learning to read, and not by innate hemispheric specialization for processing linguistic information.



## Introduction

The flankers task, traditionally used to study visual and attentional processes in visual object identification (*e.g.*, Eriksen, 1995), has been adapted as a tool for investigating the processes involved in reading multiple words (typically three: a central target word and two flanker words: *e.g.*, Snell, Meeter, & Grainger, 2017) or a single word target flanked by letters on either side (*e.g.*, Dare & Shillcock, 2013; Grainger et al., 2014). Target and flanker stimuli are presented simultaneously for a brief duration (typically 150 ms with adult participants) in order to minimize eye-movements, and participants are instructed to pay attention to and respond only to the central target stimulus. Research using the reading version of the flankers task has revealed that when flankers are letter sequences or pseudowords, then orthographic overlap (*i.e.*, the number and the position of shared letters) determines whether or not flankers impact on central target word identification (typically in a lexical decision task). In the seminal study of Dare and Shillcock (2013), bigram flankers (*e.g.*, RO ROCK CK) facilitated target identification relative to unrelated bigram flankers (*e.g.*, BA ROCK TH), and equally so when flanker position was switched (*e.g.*, CK ROCK RO). Using pseudoword flankers (*e.g.*, RONE ROSE RONE), Cauchi et al. (2020) demonstrated that it was orthographic overlap that was critical for observing flanker effects compared with phonological overlap (*e.g.*, ROZE ROSE ROZE), and work using word flankers has found effects of syntactic (Snell et al., 2017), semantic (Snell et al., 2018e), and morphological (Grainger et al., 2021) relatedness.

This body of research has led to the conclusion that sublexical orthographic information is pooled across target and flankers (see Grainger et al., 2014, for a model), and that the identities of target and flanker words can be processed in parallel hence enabling simultaneous access to the corresponding syntactic and semantic information (Snell et al.,

2017; 2018e). This all suggests that this highly simplified paradigm provides an accurate window on how multiple words are processed, as is the case during natural sentence reading (see Snell & Grainger, 2019b, for a summary of the arguments). Given that it is widely acknowledged that attentional biases operate during reading, with the bias operating to favor processing in the direction of reading (*i.e.*, to the right in languages read from left-to-right; see Ducrot & Grainger, 2007, for a review), it is important to demonstrate that such attentional biases are also present in the reading version of the flankers task.

The issue of attentional biases in the flankers task was first investigated by Snell and Grainger (2018). The key conditions tested by Snell and Grainger were when the flanker was the same word as the target and appeared either to the left or to the right, and either with no contralateral flanker or a different word in the contralateral flanker location. Flanker repetition to the right facilitated responses to central target words compared with repeated flankers on the left. In a second experiment, Snell and Grainger compared repeated flankers located to the left or to the right, with unrelated flanker words located to the left or to the right, and in both cases with no contralateral flanking stimulus. The effect of Flanker Relatedness (same word vs. different word) was significantly greater for rightward flankers than leftward flankers. Snell and Grainger concluded that there was a rightward bias in flanker effects obtained with linguistic stimuli (contrary to the leftward bias seen with non-linguistic stimuli: Harms & Bundensen, 1983; Hommel, 2003), and that this bias was most likely attentional in nature, with an asymmetric attentional window extended in the direction of reading.

The goal of the present study was to examine the developmental trajectory of directional biases in the reading version of the flankers task. To do so, we manipulated

Flanker Relatedness (same word as the target vs. different word) and the position of flanker words (left or right of targets). Strings of hashtags (####) matched in length to the flanker words were presented at the contralateral location in order to minimize the impact of exogenous attention (*i.e.*, single flankers attracting attention with potential biases in how these exogenous attentional influences operate). The effects of flanker relatedness and flanker position were studied in three groups of participants comprising children from the two main cycles of post-kindergarten primary education in France (Cycles 2 and 3), and a group of adult participants. If, as conjectured by Snell and Grainger (2018), these directional biases are driven by reading direction impacting on the distribution of spatial attention, then one would expect the biases to increase as reading expertise develops. Alternatively, these directional biases could be driven by innate hemispheric specialization, with dedicated neural structures for reading being primarily located in the left hemisphere for the majority of persons (Brysbaert, 2004). Given that information falling in the right visual field connects directly with the left hemisphere, this would engender a processing advantage for rightward flankers compared with leftward flankers (see Brysbaert & Nazir, 2005, for a discussion of this hemispheric specialization account of other directional biases in reading; and Ducrot & Grainger, 2007, and Grainger, 2022, for a discussion of contradictory evidence). In this case, the biases should be observable in the youngest readers, and not change as a function of reading expertise. Therefore, the overarching theoretical goal of the present work was to use the observed developmental trajectory of directional biases to put these alternative accounts to test.

## Method

### Participants

The adult group was composed of 56 students (46 females) from Lyon 2 University, ranging in age between 18 and 29 years (mean age = 20 years 5 months; SD = 2 years 7 months), who gave informed consent to participate in this study. They performed the task individually in a quiet experimental box. The group of children was initially composed of 281 primary school children (grade 1 = 50, grade 2 = 79, grade 4 = 79, and grade 5 = 73) from two public primary schools in Lyon. As in our previous work (Cauchi et al., 2022), the children were classified into two groups based on two of the four teaching cycles in primary education in France – Cycle 2 and Cycle 3. Grade 3 children were not tested in order to avoid reading age overlap between Cycle 2 and Cycle 3.<sup>1</sup> The two groups of children were thus formed by combining grades 1 and 2, and grades 4 and 5 (*i.e.*, the two first grades of each cycle). They were individually tested between May and July 2019 and between May and July 2021 (the lag being due to Covid-related lockdown). The reading age of each child was measured using the Alouette reading test (Lefavrais, 1967). The exclusion criteria used to constitute the final sample of children were based on (1) the performance on the main task - children with an accuracy rate lower than 60% were excluded, (2) their reading age - reading ages that did not correspond to the expected grade for a given Cycle (*i.e.*, children performing better or worse than expected on the Alouette test). These criteria led to the exclusion of 102 children.

---

<sup>1</sup> According to an official document published by the French Ministry of Education, Cycle 2, referred to as "Fundamental Learning Cycle", is considered to be the first stage of compulsory schooling for pupils (after kindergarten). It covers the first three years of primary school (1st to 3rd grades, age 6-8 yrs). Cycle 3, referred to as the "Consolidation Cycle", aims to reinforce the basic knowledge acquired in Cycle 2. It covers the last two years of primary school (4th and 5th grades, age 9-11 yrs) and the first year of secondary education (6th grade, age 11-12 yrs).

A table of the participant filtering details is provided in the Appendix 4B. The remaining sample was composed of 179 children: grade 1 = 23 (7 girls, 16 boys), grade 2 = 58 (31 girls, 27 boys), grade 4 = 46 (28 girls, 18 boys) and grade 5 = 52 (28 girls, 24 boys). Thus, there were 81 children in the Cycle 2 group (grades 1 and 2) and 98 in the Cycle 3 group (grades 4 and 5). After application of the exclusion criteria, children's reading age (RA) obtained by the Alouette reading test (that provides a reading age in months) matched closely with the children's chronological age (CA) in each group (Cycle 2: mean CA = 90 months, mean RA = 96 months; Cycle 3: mean CA = 125 months, mean RA = 130 months). All child participants were French native speakers with normal or corrected-to-normal vision and had no history of neurological and/or language impairment. Informed consent was provided by the participant's caregiver prior to experimentation and after the caregiver had explained the experiment to the child. Ethics approval for this study was granted by the *Comité de Protection des Personnes SUD-EST IV* (No. 17/051).

### **Stimulus selection and materials**

We used the same set of French target-flanker words and nonwords as used in Snell et al. (2021). The word targets and the corresponding unrelated flankers were composed of 120 pairs of words pairs selected from the Manulex lexical database (Lété et al., 2004). All words were four letters long without diacritics and did not contain any letter or bigram repetition (*e.g.*, *bébé*, *papa* ["baby", "dady"]). According to the Manulex corpus, these words should be known by 1<sup>st</sup> graders (meaning that these words are regularly encountered in the books used to teach reading in 1<sup>st</sup> grade). Word frequency was transformed into Zipf values (van Heuven et al., 2014). The average frequency was 6.07 (range = 5.15 – 7.94) for the target words and was 5.89 (range = 4.41 – 7.77) for the unrelated flanker words. None of the words

in each target-flanker pair were orthographically or semantically related. A set of 120 nonword pairs were generated using the Wuggy pseudoword generator (Keuleers & Brysbaert, 2010). As with the word stimuli, none of the nonwords in each pair were orthographically related. Nonwords were included for the purpose of the lexical decision task and were not included in the analyses.

The factorial combination of two within-participant factors - Flanker Relatedness (related, unrelated) and Flanker Position (left, both, right) - generated 6 experimental conditions (see Table 1 for a description of these 6 conditions). Each group of participants (Cycle 2, Cycle 3, and adults) was tested with these 6 conditions leading to a 2 X 3 X 3 design. Related flankers were the same word / nonword as the target, and unrelated flankers were different words / nonwords. Flanker words could appear to the left or to the right of the target, with a four hashtags string (####) appearing at the same time in the contralateral location, or could appear both to the left and to the right of the target (referred to as the “both” condition). A Latin-square design was used with six experimental lists such that participants saw each target once only in one of the six conditions. All target words were tested in all conditions across the participants. There were 40 items (20 words, 20 pseudowords) per condition per participant. The 240 trials were allocated in 10 blocks. Items and blocks were presented in randomized order. The complete set of word stimuli is provided at <https://osf.io/py2bk> (URL at The Open Science Framework, OSF) and in the Appendix 4A.

**Table 3.** Examples of targets (center) and flankers in the six experimental conditions.

| Relatedness | Flanker position |                |                |
|-------------|------------------|----------------|----------------|
|             | left             | both           | right          |
| related     | park park ####   | park park park | #### park park |
| unrelated   | nose park ####   | nose park nose | #### park nose |

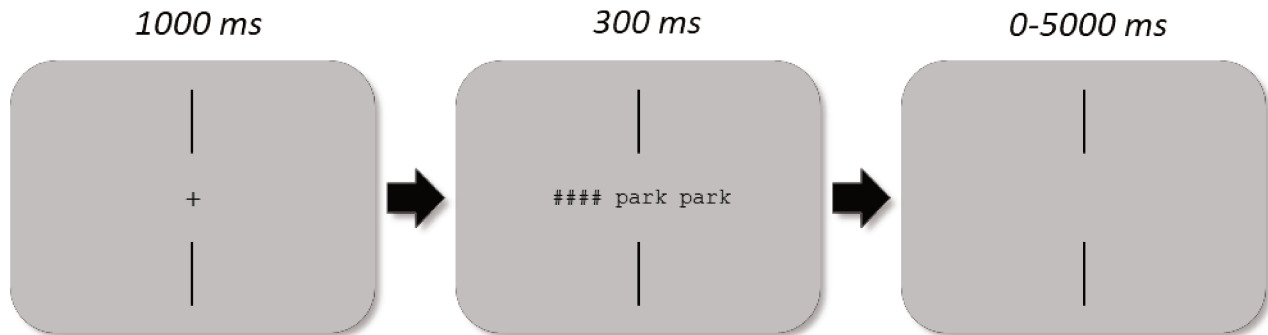
### Apparatus and software

The experiment was implemented with OpenSesame (Mathôt et al., 2012). Stimuli were presented on a DELL Latitude 3400 monitor calibrated in 14-inch (1366×768 px, 80 Hz). Participants were seated at approximately 50 cm from the display. Stimuli were displayed in lower case, Courier New font (monospace), in black on a light grey background. From a viewing distance of 50 cm, each character subtended 0.33 degrees of visual angle.

### Procedure

The procedure for a single trial is depicted in Figure 1. Each trial started with a 1000 ms centralized fixation cross bounded by vertically aligned bars. The target and flanking stimuli were then presented for a duration depending on the participant's group (300 ms for children and 170 ms for adults). Participants had a maximum of 5000 ms to make their lexical decision with a right- (“m”) or left-handed (“q”) button press (azerty keyboard layout) for respectively word and nonword targets. The response was followed by a 1000 ms empty blank screen preparing the next trial. The trials were subdivided into 10 blocks of 24 trials randomly presented. To avoid fatigue, a break was offered in between blocks. The total duration of the experiment was about 20 min for adults and 25 to 35 min for children. Children were tested with the Alouette reading test that lasted about 3 min before

performing the main task, and all testing took place in a quiet room in the school where the children were tested two at a time.



**Figure 1.** Description of the procedure with an example of a related flanker in the rightward position with the stimulus duration used for child participants. After 1000 ms, the fixation cross disappeared, and target (on fixation) and flankers were displayed onscreen for 300 ms and centred with respect to the vertical fixation bars. There was a time-out of 5 sec to give a lexical decision response before the next trial was initiated.

### Statistical power estimation

Statistical power was estimated a posteriori using the simulation approach suggested by Brysbaert and Stevens (2018). We employed the Monte Carlo method using the *powerSim* function from the *simR* package (Version 1.0.5; Green & MacLeod, 2016). The both-related versus both-unrelated contrast was targeted in this analysis using the observed size of the Flanker Relatedness effect in RTs in the groups of participants (40 ms in the adult group and 68 ms in the children group). At each iteration, the program selected a random sample of items and participants from the original dataset and fitted a linear-mixed-effects model from which the statistical power was estimated 20 times. Each sample selection was constrained to retain a 50% reduced sample from the original dataset (*i.e.*, 60/120 items to 28/56 participants from the adult group and 90/179 participants in the children group dataset). In this way, the estimated statistical power was 88.8% in the adult group, and 99.5% in the children group. Considering the standard of 80%, we reckoned to have sufficient power in this study.



## Results

The data for target words were analyzed using the R statistical computing environment (R Core Team, 2018). In order to avoid over-additive effects due to differences in average RT across groups (Faust et al., 1999), and in order to normalize the RT distributions, the raw RT data of each participant were standardized using a z-score transformation (see L  t   and Fayol, 2013; Ziegler et al., 2014; Cauchi et al., 2022, for examples of this approach). For z-score analyses, linear-mixed effects models were fitted (Baayen et al., 2008) using the *lmer* function from the *lme4* package (Version 1.1-21, Bates et al., 2014) including both the participant and item factors as random effects. The maximal random effect structure that converged was used for each model (Barr et al., 2013), and the significance of the fixed effects was determined with a type III Wald chi square test using the *Anova* function from the *car* package (Version 3.0-8, Fox and Weisberg, 2011). For the accuracy analyses, a generalized mixed-effects model was fitted with the *glmer* function from the package cited above, using the same structure as the models used for the z-score analyses, except that the accuracy variable was coded as a binomial response with 1 for a correct response and 0 for an error.

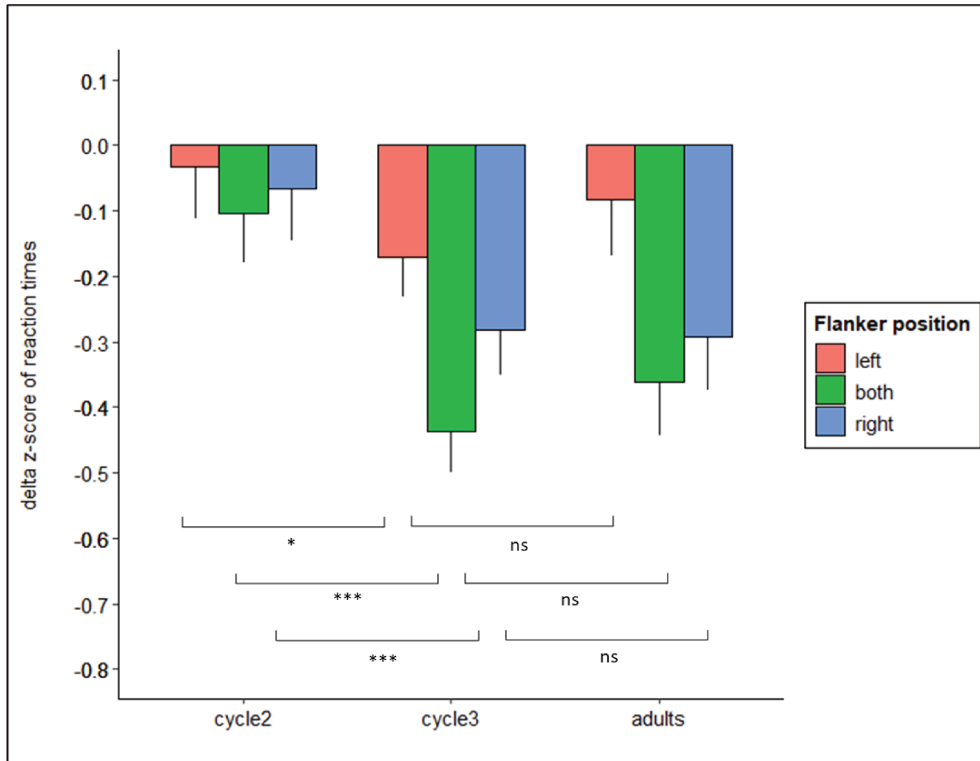
**Table 4.** Mean RTs (in milliseconds) and accuracy (probabilities) for word targets in each of the experimental conditions and for the three groups of participants.

|                         | Flanker Position | RTs / Relatedness |            | $\Delta$ (signif.) | Accuracy / Relatedness |           | $\Delta$ (signif.) |
|-------------------------|------------------|-------------------|------------|--------------------|------------------------|-----------|--------------------|
|                         |                  | related           | unrelated  |                    | related                | unrelated |                    |
| <i>Cycle 2 (n = 81)</i> | left             | 1302 (324)        | 1310 (315) | 8 (ns)             | .79 (.11)              | .78 (.13) | .01 (ns)           |
|                         | both             | 1302 (345)        | 1334 (307) | 32 ( *)            | .81 (.11)              | .75 (.14) | .06 (***)          |
|                         | right            | 1295 (321)        | 1316 (311) | 21 (ns)            | .78 (.12)              | .73 (.15) | .05 (***)          |
| <i>Cycle 3 (n = 98)</i> | left             | 864 (138)         | 904 (163)  | 60 (***)           | .91 (.08)              | .89 (.12) | .02 (***)          |
|                         | both             | 841 (127)         | 940 (166)  | 99 (***)           | .93 (.08)              | .88 (.11) | .05 (***)          |
|                         | right            | 854 (140)         | 913 (142)  | 59 (***)           | .92 (.07)              | .88 (.13) | .04 (***)          |
| <i>Adults (n = 56)</i>  | left             | 609 (64)          | 618 (66)   | 9 ( *)             | .96 (.04)              | .95 (.07) | .01 (ns)           |
|                         | both             | 603 (58)          | 643 (66)   | 40 (***)           | .96 (.06)              | .95 (.05) | .01 (ns)           |
|                         | right            | 601 (61)          | 632 (69)   | 31 (***)           | .97 (.04)              | .95 (.07) | .02 (ns)           |

Note. Standard deviations in parentheses. Relatedness effects (unrelated – related) and their significance (in parentheses) are provided after the condition means of the Relatedness factor. Significance levels: \*\*\*  $p < .001$ , \*\*  $p < .01$ , \*  $p < .05$ , and <sup>ns</sup>  $p > .10$ . Flanker Position refers to the position of the related flanker(s).

### Standardized RT analyses

Prior to the z-score transformation all trials with RTs lying beyond 300 and 3000 ms (Cycle 2 = 8.4%, Cycle 3 = 1.4%, adults = 1.2%) were excluded. Furthermore, for each group of participants, a null model with a random structure including by-participant and by-item random intercepts was fitted in order to compute standardized residuals from the RTs. All trials with standardized residuals larger than 2.5 standard deviations were excluded (Cycle 2 = 2.9%, Cycle 3 = 2.9%, adults = 2.6%). Incorrect responses were also excluded from the RT analyses (Cycle 2 = 22.3%, Cycle 3 = 9.8%, adults = 4.6%). Condition means of raw RTs and accuracy are provided in Table 2.



**Figure 2.** Differences ( $\Delta$ ) expressed in z-score values between the two Flanker Relatedness levels (related, unrelated) for each Flanker Position (left, both, right) and for each group (Cycle 2, Cycle 3, adult). Significance brackets correspond to pairwise Flanker Relatedness by Group interactions (Cycle2 vs. Cycle3; Cycle 3 vs. Adults) for each Flanker Position. Significance levels: \*\*\*  $p < .001$ , \*\*  $p < .01$ , \*  $p < .05$ , and ns  $p > .10$ . Error bars are the within-participant 95% CIs (Cousineau & O’Brian, 2012). Flanker Position refers to the position of the related flanker(s).

The effects of Flanker Relatedness (in standardized RTs) per Flanker Position and Group are shown in Figure 2. The main effects of Flanker Position and Flanker Relatedness were significant ( $\chi^2(2) = 13.53, p < .01$ ;  $\chi^2(1) = 270.84, p < .001$ ; respectively). The main effect of Group was not significant ( $\chi^2(2) = 4.30, p > .10$ ), as to be expected when analyzing normalized RTs. The Flanker Position by Flanker Relatedness interaction was significant ( $\chi^2(2) = 48.29, p < .001$ ), with the strongest effects of Flanker Relatedness in the both flanker condition, followed by the right position and finally the left position. The Flanker

Relatedness by Group interaction was also significant ( $\chi^2 (2) = 49.74, p <.001$ ), with greater effects of Flanker Relatedness in the older children of Cycle 3 and in adults. Crucially, the three-way Flanker Position by Flanker Relatedness by Group interaction was significant ( $\chi^2 (4) = 10.06, p <.05$ ). As can be seen in Figure 2, the increase in effects of Flanker Relatedness from Cycle 2 to Cycle 3 were much greater for the both and the right position conditions compared with the left condition. Follow-up analyses testing for the Flanker Relatedness by Group interaction as a function of Flanker Position revealed that the interaction was not significant for the left position ( $\chi^2 (2) = 5.34, p =.07$ ). On the other hand, the interaction was significant for the both Flanker Position ( $\chi^2 (2) = 33.99, p <.001$ ) and for the right Flanker Position ( $\chi^2 (2) = 15.32, p <.001$ ).

### **Accuracy analyses**

The effect of Flanker Relatedness for accuracy rates per Flanker Position and Group are shown in Table 2. The main effects of Flanker Relatedness and Group were significant ( $\chi^2 (1) = 51.62, p <.001$ ;  $\chi^2 (2) = 262.70, p <.001$ ; respectively) with higher accuracy in the related flanker conditions and increasing accuracy with age. The main effect of Flanker Position was not significant ( $\chi^2 (2) = 0.70, p >.10$ ). No interaction effects were significant in this analysis.

### **Discussion**

Prior research with adult participants reported a rightward bias in the reading version of the flankers task (Snell & Grainger, 2018). Word flankers located to the right of central target words had a bigger impact on target word processing (greater effect of target-flanker relatedness) than flankers located to the left. Here we investigated the developmental

trajectory of this bias. We tested one group of adult participants and two groups of French primary school children from the “Fundamental Learning Cycle” (Cycle 2: 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup>) and “Consolidation Learning Cycle” (Cycle 3: 4<sup>th</sup> and 5<sup>th</sup> graders) in primary education in France. In the related conditions, the central target word was flanked by the same word either on the left (park park #####), on the right (##### park park), or on both sides (park park park). In the unrelated conditions, the related flankers were replaced by a different unrelated word.

In an analysis of standardized RTs (z-score transformation), we found a significant three-way interaction between flanker relatedness, the position of the related flankers, and the three groups of participants. Effects of flanker relatedness did not significantly vary as a function of reading expertise in the left flanker position condition. On the other hand, in the both positions and right position conditions, there was a significant increase in effects of flanker relatedness as reading expertise increased, which was mostly evident when comparing the two groups of children (see Figure 2). Thus, when there was a related flanker located to the right of targets (*i.e.*, in the both and the right position conditions), then effects of flanker relatedness increased significantly across the two groups of children (grades 1 and 2 vs. grades 4 and 5). However, we note informally that the mean raw RTs per condition, presented in Table 2, reveal a slightly different pattern. That is, the increase in effects of flanker relatedness between Cycle 2 and Cycle 3 was comparable for the left and right flanker positions, with the both positions condition generating the strongest effects in both groups. The emergence of a rightward bias in the raw RTs was only evident in the comparison of Cycle 3 and Adults, where there was a greater decrease in the effects of flanker relatedness for flankers in the left position. Nevertheless, it is clear from the formal analysis of standardized RTs and the informal examination of raw RTs that the rightward bias in effects

of flanker relatedness does develop as reading expertise increases. These results confirm the interest of using a z-score transformation of RTs to reveal differences in effects of a given variable on RTs across groups that exhibit large individual differences in average RT (Faust et al., 1999).

The reading-related attentional bias account of previous findings (Snell & Grainger, 2018) predicted that the rightward bias should increase as reading expertise increases. On the other hand, the hemispheric specialization account (information from rightward flankers arrives more rapidly in reading-specific neural structures) predicted that the rightward bias should not depend on reading expertise, given that neuronal specialization is thought to be innate. In line with the attentional account, we found an increase in the rightward flanker bias (*i.e.*, greater effects of Flanker Relatedness for right-side flankers) with increasing reading expertise. Moreover, there were no significant changes in effects of Flanker Relatedness for leftward flankers across the three reading-level groups. On the other hand, the effects of Flanker Relatedness for rightward flankers, and also in the both positions condition, increased from Cycle 2 to Cycle 3, and then remained stable. In Cycle 2, the effects of Flanker Relatedness did not depend on flanker position, whereas they did in Cycle 3 and adults. In Cycle 3, it was the both flanker condition that generated the greatest effects, followed by the right condition and then the left position. In the adult group, the both flanker condition and the right flanker condition produced the greatest facilitation, and did not differ significantly. This is clear evidence that the rightward bias seen in prior work with the flankers task (Snell & Grainger, 2018) requires a minimum amount of reading expertise to emerge. That is, this specific bias in the direction of reading, is a reading-related phenomenon and not some form of generic attentional bias, or due to hemispheric specialization.

### 6.3 Conclusion Chapitre 6

Dans cette étude, nous avons cherché à pister les trajectoires développementales du biais d'asymétrie attentionnelle vers la droite rapportée dans plusieurs travaux en oculométrie (*e.g.*, Rayner, 1986 ; Häikiö et al., 2009) et en amorçage parafovéal (*e.g.*, Khelifi et al., 2015). Nos résultats montrent d'abord une augmentation continue de l'effet de la relation orthographique entre les flankers et le mot cible entre le groupe de 1-2<sup>ème</sup> année, le groupe de 4-5<sup>ème</sup> année et le groupe d'adulte. Ensuite, l'analyse des effets standardisés entre les groupes a montré que l'impact du flanker localisé à droite augmente entre le cycle 2 (grade 1-2) et le cycle 3 (grade 4-5) et reste stable entre le cycle 3 et le groupe d'adulte. Ce résultat nous permet de situer l'émergence du biais attentionnel vers la droite entre la 4-5<sup>ème</sup> année d'apprentissage de la lecture. Toutefois, les données rapportées dans cette étude ne contredisent pas nos résultats précédents (Snell et al., 2021, chapitre 4) selon lesquels l'attention est suffisamment étendue chez les jeunes lecteurs pour qu'ils parviennent à traiter les informations en provenance des flankers car on observe un effet significatif de la condition de flankers bilatéraux dès le cycle 2 (grade 1-2).

Nous pouvons conclure que le biais attentionnel vers la droite est bien dû à une asymétrie attentionnelle dans le sens de la lecture et non pas à une spécialisation hémisphérique innée pour la lecture. En conséquence, cette asymétrie tend à se développer graduellement pendant l'apprentissage de la lecture.

## Chapitre 7 - Conclusion générale

L'objectif de cette thèse était de pister les trajectoires développementales de l'intégration spatiale de l'information orthographique. À cette fin, nous avons testé la Flankers Task auprès de plusieurs échantillons d'enfants de la 1<sup>ère</sup> à la 6<sup>ème</sup> année d'apprentissage de la lecture et d'adultes. Nous avons pu étudier les effets de relation orthographique de bigrammes et de mots entiers (Snell et al., 2021), les effets de la structure morphologique (Cauchi et al., 2022), et le biais d'asymétrie attentionnel vers la droite du mot fixé (Cauchi et al., en soumission). Un travail complémentaire effectué uniquement chez l'adulte a apporté des éléments de compréhension sur la contribution des informations phonologiques dans les effets de recouvrement orthographique observés avec la Flankers Task chez l'adulte (Cauchi et al., 2020).

### *Résumé des résultats chez l'enfant*

Dans un certain nombre de cas, nos études ont permis de différencier les processus qui relèvent d'une mise en place progressive de ceux qui n'en relèvent pas, *i.e.*, les processus de base de l'activité de lecture qui sont présents précocement chez l'enfant.

L'étude 2 (la première étude chez l'enfant) a constitué une base exploratoire pour les effets de flankers qui n'avaient pas encore été étudiés chez l'enfant. Cette étude a mis en évidence que les effets de la relation orthographique peuvent être observés après seulement un an d'apprentissage de la lecture. Ces résultats nous permettent de supposer que le codage flexible de l'identité des lettres en parafovéa relève des processus de base de la lecture (voir Milledge et al., 2021 pour des preuves convergentes).



L'étude 3 a étudié les effets de la relation morphologique entre les flankers et la cible, observés antérieurement chez des participants adultes. Devant l'absence d'effets avérés chez l'enfant, nous en avons déduit que le développement de l'intégration des informations complexes en parafovéa, comme les informations morphologiques, demande plusieurs années pour atteindre les capacités des lecteurs experts<sup>1</sup>. Dans cette même étude, nous avons pu mettre en évidence que les effets de la relation orthographique sont observés à partir de la 3<sup>ème</sup> année d'apprentissage dans le cas de mots entiers en parafovéa, en accord avec les résultats d'autres études (*e.g.*, Known et al., 2007 ; Khelifi et al., 2015).

L'étude 4 a étudié le biais attentionnel vers la droite et a montré qu'il n'est pas présent chez les enfants entre la 1-2<sup>ème</sup> année mais qu'il émerge entre la 4-5<sup>ème</sup> année. Le biais attentionnel dans le sens de la lecture nécessite un minimum d'expertise en lecture pour être observé et nous pouvons donc considérer qu'il n'est pas lié à une spécialisation hémisphérique innée pour les informations linguistiques. Ce dernier point rejoint les observations de Sperlich et al. (2015) selon lesquelles les processus d'identification du mot se développent plus précocement que la taille de l'empan perceptif.

À partir de l'ensemble de ces résultats, nous pouvons considérer que : 1) la capacité à traiter de l'information en parafovéa au-delà du mot fixé apparaît après seulement un an d'enseignement de la lecture ; cette capacité s'inscrit dans les processus de base de l'activité de lecture ; 2) le traitement en parafovéa d'informations complexes, comme les informations morphologiques, semble relever de capacités nécessitant une certaine expertise en lecture

---

<sup>1</sup> Des données pilotes chez des collégiens de 6-8<sup>ème</sup> année mettent en évidence un patron de résultats similaire à celui de l'adulte à partir de la 7<sup>ème</sup> année d'apprentissage de la lecture avec le même matériel expérimental que celui utilisé dans l'étude 3.

et, plus précisément, une certaine automatisation des processus impliqués dans la décomposition de la structure morphologique des mots ; 3) le biais d'asymétrie attentionnelle relève davantage du développement de facteurs cognitifs que d'une spécialisation hémisphérique innée pour la lecture.

### 1. *Intégration de ces résultats dans le modèle OB1-reader*

Est-ce que ces résultats auraient pu être prédits par le modèle *OB1-reader*, cadre théorique de cette thèse ? La question pourrait paraître difficile étant donné qu'aucune version développementale du modèle n'a encore été proposée. Il est toutefois possible d'émettre des hypothèses informelles à partir de l'architecture qui a été utilisée pour simuler les résultats du *flanker effect* chez l'adulte (voir Meeter et al., 2020) et de s'appuyer sur les éléments rapportés dans les simulations de données développementales effectuées par *E-Z Reader* (Reichle et al., 2013) afin d'élaborer une version "apprentissage de la lecture" d'*OB1-reader*.

Comme évoqué au chapitre 1, la particularité d'*OB1-reader* est d'adopter une architecture qui tient compte à la fois des données de la littérature sur l'identification du mot écrit et sur celles concernant la lecture de phrases. À notre avis, son versant sur le mot écrit lui permettrait de simuler efficacement nos résultats chez l'enfant. En effet, son interface basée sur le codage flexible de l'identité et de la position des lettres dans les mots et entre les mots lui permettrait de simuler une partie de nos résultats chez l'enfant. Les explications sur cette supposition sont détaillées plus bas.

## 1.1 Simuler l'apprentissage de la lecture

Le premier point qui semble essentiel est de trouver une approche permettant de passer d'une version de la lecture experte à une version "apprentissage de la lecture" d'*OB1-reader*. Ce changement passera inévitablement par la modification de certains paramètres du modèle afin qu'il soit moins performant, notamment pour le facteur le plus basique des compétences en lecture à savoir le traitement du mot. La solution qui avait été proposée par Reichle et al. (2013) était de diminuer la performance du modèle dans le traitement lexical en multipliant par deux les durées de fixation sur un mot passant de 104 ms pour la version adulte à 208 ms pour la version enfant. Pour ce qui concerne une version "apprentissage de la lecture" d'*OB1-reader*, la solution serait donc d'augmenter le temps de traitement effectué sur le mot afin que cela ait un impact inévitable sur la distribution de l'attention spatiale dans le modèle. En effet, la distribution de l'attention spatiale est basée sur des valeurs qui varient en fonction de la complexité du mot fixé ; l'étendue de l'attention augmente pour les mots fréquents et diminue pour les mots complexes (voir Ans et al., 1998). En partant du postulat que, chez l'enfant, le temps de traitement du mot est ralenti et que l'étendue de l'attention spatiale diminue par rapport à celle du modèle initial de l'adulte, nous pensons que le modèle pourrait simuler correctement les résultats selon lesquels les enfants sont capables de traiter en parafovéa des flankers constitués de bigrammes en 1<sup>ère</sup> année et que cette capacité augmente avec l'âge pour atteindre le mot entier. La question concernant l'absence d'effets de la relation morphologique entre les flankers et la cible chez l'enfant est un point plus complexe, car encore mal compris, et nous pensons que l'augmentation du temps de traitement effectué sur le mot pourrait simuler ces effets mais pas les expliquer. Enfin, pour

les résultats sur le biais d'asymétrie de l'attention vers la droite chez l'enfant, nous pensons qu'un simple ajustement dans le modèle pourrait lui permettre de simuler ces résultats.

### *1.2 Prise en compte des effets de flankers orthographiques*

Les effets de la relation orthographique ont été étudiés dans nos trois études menées chez l'enfant. Dans l'étude 2, les résultats ont mis en évidence que l'attention du jeune lecteur de 1<sup>ère</sup> année s'étend au-delà du mot fixé pour les bigrammes uniquement. Dans l'étude 4 sur le biais attentionnel, nous avons utilisé le même matériel que dans l'étude 2, avec des mots entiers uniquement en flankers. Nous avons montré que les flankers de 4 lettres ont un impact dès le cycle 2 (1<sup>ère</sup>, 2<sup>ème</sup> année). Ces deux résultats apportent des preuves sur le fait que les enfants de 1<sup>ère</sup> année parviennent au minimum à traiter 2 lettres en parafovéa et que les enfants de 2<sup>ème</sup> année parviennent à traiter au minimum un mot de 4 lettres. Un autre résultat intéressant sur les effets de la relation orthographique a été fourni par l'étude 3 sur la morphologie. Pour les deux conditions contrôle-orthographique (stem-stem et derived-derived), nous avons observé qu'en fin de cycle 2 (3<sup>ème</sup> année), le traitement de la cible est facilité par des flankers de 4 lettres en moyenne (condition stem-stem) mais pas par des flankers de 5-6 lettres en moyenne (condition derived-derived). Au cycle 3 (4<sup>ème</sup>, 5<sup>ème</sup> année), le traitement de la cible était facilité par les deux types de flankers. Ce résultat sous-tend que les capacités de traitement en parafovéa se développent jusqu'à la 5<sup>ème</sup> année au minimum. Nous pensons que l'ensemble de ces résultats peuvent être correctement simulés par le modèle grâce à la proposition d'augmentation du temps de traitement du mot. Cette augmentation aura un impact direct sur la répartition de l'attention spatiale des entrées visuelles impliquant inévitablement un rétrécissement de l'étendue attentionnelle avec la

complexité du mot. Les différentes tailles d'impact de flankers en fonction de l'âge relèveraient d'un simple ajustement en fonction de l'expertise en lecture.

### *1.3 Prise en compte des effets de flankers morphologiques*

Les résultats de l'étude 3 sur la morphologie montrent un patron de résultats clair entre l'enfant et l'adulte : les flankers reliés morphologiquement ont facilité le traitement du mot cible chez l'adulte uniquement ; aucun effet n'a été observé dans les deux groupes d'enfants. Cette étude pose clairement la question de l'expertise en lecture. Le fait que les adultes accèdent à l'identification du mot cible sur la base de la relation morphologique entre le flanker et la cible nécessite qu'ils aient automatisé les processus de décomposition morphologique. Par contre, l'absence d'effet chez les enfants n'implique pas nécessairement qu'ils n'accèdent pas aux processus de décomposition morphologique mais pourrait indiquer seulement que ces processus sont moins automatisés chez eux que chez l'adulte.

Notre solution proposée plus haut pour pouvoir simuler l'ensemble des résultats sur les flankers orthographiques était d'augmenter le temps de traitement effectué sur le mot. Malheureusement, nous pensons que cette solution n'est pas satisfaisante pour simuler les résultats sur les flankers morphologiques chez l'enfant. Une solution complémentaire pourrait être que l'augmentation du temps de traitement du mot soit accompagnée d'une diminution du niveau d'activation des sous-unités en bigrammes ouverts lors de la présentation d'un mot. Ce changement aurait une incidence directe sur la sélection correcte du mot parmi les candidats activés dans le lexique de mots entiers car cette diminution d'activation engendrerait probablement une inhibition plus importante entre les mots en compétition. En partant de cela, l'observation selon laquelle chez l'enfant la condition reliée

morphologiquement (ami amitié ami) ne facilite pas l'identification du mot par rapport à la condition sans rapport (son amitié son) serait simulée par une compétition lexicale entre plusieurs mots, provoquée par une sous-activation des sous représentations générées à partir du mot fixé et des flankers. Compte tenu du fait que les compétences de base en lecture sont limitées chez les enfants, il y a des raisons d'estimer que le niveau d'activation des sous-représentations est plus faible chez eux que chez l'adulte. Toutefois, il semble difficile de concevoir que ce patron de résultats soit dû uniquement à des capacités réduites pour le traitement du mot chez l'enfant. Nous pensons que d'autres études devront préciser les processus qui sont à l'œuvre afin d'expliquer ce patron de résultat.

#### *1.4 Prise en compte du biais d'asymétrie vers la droite*

La conclusion tirée sur le biais d'asymétrie attentionnelle chez l'enfant est que ce biais semble relever davantage du développement de facteurs cognitifs que d'une spécialisation hémisphérique innée pour la lecture. Les résultats que nous rapportons montrent que ce biais est bien installé en cycle 3, *i.e.*, aux alentours de la 4<sup>ème</sup> année d'apprentissage, mais n'est pas présent au cycle 2. La littérature en lecture de phrases a montré que cette asymétrie est présente dès la 2<sup>ème</sup> année d'apprentissage et se développe jusqu'en 6<sup>ème</sup> année (Rayner, 1986 ; Häikiö et al., 2009). Une version "apprentissage de la lecture" d'*OB1-reader* pourrait simuler facilement ce résultat par une simple modification du modèle. La proposition qui est faite ici est de mettre en lien le paramètre d'asymétrie attentionnelle avec le ou les paramètres choisis pour augmenter le temps de traitement du mot dans le modèle. En l'état, le modèle est effectivement doté d'un paramètre qui détermine comment se distribue l'asymétrie dans les hémichamps. Ce paramètre est basé sur la littérature suggérant que l'empan perceptif est asymétrique vers la droite (14-15 caractères sur la droite et de 4-5

caractères sur la gauche ; Rayner et al., 1986, 1998). Il est donc déterminé à priori comme étant quatre fois plus grand sur la droite que sur la gauche (voir Snell et al., 2018d). Un ajustement de l'asymétrie attentionnelle qui serait fonction du temps de traitement du mot serait, selon notre approche, un bon début pour simuler l'émergence du biais d'asymétrie attentionnelle vers la droite chez l'enfant.

En conclusion de cette partie ayant trait à la simulation des résultats par le modèle *OB1-reader*, il semble que l'approche de traitement en parallèle utilisée par la classe des modèles PG (*Parallel Graded*) semble compatible avec la simulation de données développementales. Bien sûr, cette affirmation nécessite que ces effets soient appréhendés à travers un cadre plus formel de simulation afin de pouvoir tenir compte de l'ensemble des modifications nécessaires dans le paramétrage d'une version "apprentissage de la lecture" du modèle. En cas de succès, nous pensons que ces simulations constitueraient une réelle avancée dans le champ de la recherche sur l'intégration spatiale de l'information orthographique.

## *2. Les apports méthodologiques de l'étude 1 : Flankers Task vs. Priming Task*

Nous évoquons ici les apports méthodologiques de la Flankers Task en tant que mesure de l'intégration spatiale de l'information orthographique durant la lecture de mot en la comparant à la Priming Task.

Dans l'étude 1, la comparaison des résultats obtenus entre l'expérience 1 utilisant la tâche de flankers et l'expérience 2 utilisant la tâche d'amorçage a permis de mieux comprendre la différence entre ces deux tâches. En amorçage, nous avons répliqué les résultats de Grainger et Ferrand (1992, 1993) selon lesquels les amorces pseudo-

homophones facilitent l'identification du mot cible, alors qu'en Flankers Task, l'effet de facilitation provenait uniquement des flankers contrôle-orthographique. Comment expliquer ces patrons de résultats différents ?

La Flankers Task est une tâche qui révèle des effets spatiaux, ceux qui sont à l'œuvre dans l'intégration spatiale de l'information. La tâche d'amorçage, quant à elle, est une tâche qui révèle des effets temporels, ceux qui sont à l'œuvre dans l'intégration temporelle de l'information. Dans la tâche d'amorçage, on affiche brièvement une amorce avant la présentation du mot cible. La plupart du temps, l'amorce est localisée au même endroit que le mot cible. Le traitement du mot cible s'effectue alors au sein d'un canal unique de traitement. Dans la tâche de flankers, on affiche simultanément des stimuli séparés par un espace. Le mot cible et les flankers ne sont pas localisés au même endroit, le traitement des stimuli s'effectue alors au sein de multiples canaux de traitement (voir Snell et al., 2018a). L'étude 1 a permis de mettre en évidence la différence entre le traitement dans un canal unique et le traitement dans des canaux multiples. On s'aperçoit que lorsque la relation phonologique entre l'amorce et le mot cible est traitée dans un canal unique, elle facilite la reconnaissance du mot cible par rapport à une condition contrôle. En revanche, lorsqu'elle est traitée dans des canaux multiples, elle ne facilite plus la reconnaissance du mot par rapport à une condition contrôle, à cause de la plus grande distribution des informations dans la Flankers Task. Les résultats de l'étude 1 ont confirmé le rôle clé des informations orthographiques dans le traitement effectué par des canaux multiples. Les informations qui codent pour le niveau de traitement phonologique ne peuvent être extraites que dans un canal unique.



### 3. La Flankers Task dans l'étude sur les effets de la parafovée sur la fovée

Le domaine d'étude nommé *parafoveal-on-foveal effect* est dominé par les recherches sur les mouvements oculaires (*e.g.*, Schotter et al., 2012 ; Kennedy & Pynte, 2005). Dans ce contexte, il apparaît essentiel de situer la Flankers Task relativement à ce domaine et de souligner ses particularités par rapport aux paradigmes utilisés dans les tâches de lecture de phrases utilisant le recueil de mouvements oculaires.

Par rapport à ces tâches, la Flankers Task présente au moins deux différences majeures. La première différence est qu'elle permet de tester l'impact direct et unique de la relation linguistique entre les flankers et le mot fixé en un temps donné, là où l'ensemble des paradigmes de la lecture de phrases ne peuvent pas toujours le tester. En effet, dans les tâches de lecture de phrases, beaucoup de conclusions sur les effets de la parafovée sur la fovée sont tirées du recueil de temps de fixation sur le mot  $n$  en fonction du mot  $n+1$  (*e.g.*, Angele et al., 2013). Il est important de rappeler que cette mesure est nécessairement affectée par des traitements post-lexicaux (voir Warren et al., 2011) qui peuvent être liés à la lecture des mots précédents. Ce qui est recherché avec la Flankers Task, c'est de mesurer l'impact direct et unique de la relation entre les éléments en parafovée et le mot fixé. En cela, il est possible d'isoler une relation lexicale entre un mot  $n$  et des mots  $n-1$  et  $n+1$ .

La deuxième différence entre ces tâches est que la Flankers Task est avant tout une tâche dans laquelle le temps de réaction recueilli correspond au temps de décision lexicale du sujet, et non uniquement au temps d'identification du mot (voir Balota & Chumbley, 1984). Pour ce qui concerne les tâches de lecture de phrases, on sait que le temps de fixation sur le

mot est une mesure plus pure de chronométrie mentale, donnant une mesure peut-être plus directe du temps réel d'identification du mot.

En somme, nous considérons que la Flanker Task permet d'étudier de façon simple et optimale les contributions des informations parafovéales lorsque l'œil est stationnaire, ce qui est beaucoup plus difficile à réaliser en oculométrie car l'information à présenter en parafovéa est plus difficile à manipuler. L'intérêt des études utilisant la Flankers Task est de manipuler précisément la relation entre le mot fixé et le mot en parafovéa. En étudiant ces effets isolés, nous pensons que l'on peut parvenir plus finement à dissocier les effets de bas niveau et de plus haut niveau qui interviennent dans la lecture. Cette distinction nous permettrait de fournir des cadres théoriques plus précis et de mieux comprendre la part qui revient à chacun de ces effets.

## Chapitre 8 – Perspectives de recherches futures

À partir des travaux conduits au cours de cette thèse, et notamment le dernier travail sur l'asymétrie attentionnelle, des idées ont émergé pour l'étude de l'intégration spatiale de l'information orthographique. En étudiant les processus d'intégration de l'information, nous avons proposé de faire varier les excentricités entre le mot cible et les flankers. Le projet qui en découle propose d'évaluer la taille de l'empan perceptif par d'autres méthodes que celles utilisées traditionnellement. Il propose également un paramétrage du module de la distribution de l'attention spatiale dans le modèle *OB1-reader*.

Le projet a été soumis avec succès pour l'obtention d'une allocation postdoctorale de la Fondation FYSSEN. Cette thèse débouche donc sur un postdoctorat au laboratoire LEARN! – Learning Sciences, à l'Université de Vrije à Amsterdam, sous la direction de Martijn Meeter, sur une période de deux ans. Le projet postdoctoral complet est présenté ci-dessous.

# **Effects of eccentricity on the spatial integration of information during reading**

## **Abstract**

Parallel processing spanning multiple words is a hot topic in current reading research. OB1-reader (Snell et al., 2018d) is one of the first models to implement a parallel processing system, hence pioneering a major advance in the field. The objective of this project is 1) to investigate how the spatial integration of information spanning multiple words decreases as a function of eccentricity, and 2) to implement key adjustments to OB1-reader based on the empirical findings. The results of a pilot study validate the procedure to be used in the project – that is, the flankers task with a central target word flanked to the left and/or to the right by word(s) located at varying eccentricities. Results are expected not only to inform key parameter adjustments in OB1, to be validated by further tests of the model, but also, more generally, to provide new fundamental knowledge about how skilled readers read.

Keywords: reading, word recognition, eccentricity, computational modeling, flankers task, skilled reading

## **8.1 Theoretical background**

Of all neuro-visual activities, reading is probably one of the most intriguing in the field of the cognitive sciences. This activity is both a visual and a linguistic skill in which the identities and positions of letters within the words must be interfaced and integrated. After repeated exposure to the basic elements of language, hundreds, thousands, and tens of thousands of times, the blocks of letters (*i.e.*, words) are automatically and irrepressibly integrated to form a meaningful interpretation. Since this mechanism requires eye

movements in order to gather information, it seems important to consider the spatial aspect in any attempt to describe it. As a scientific inquiry into fundamental human cognitive processes, this project is consistent with the objectives of the FYSSSEN Foundation. The question of how information is acquired during reading is of crucial interest to the current research. The view of reading as a sequential word-by-word retrieval process has been inherited from the intuitive comparison between reading and speech perception. Older models of written word recognition themselves inherited this view and have begun to reveal limitations that render the associated systems untenable in the face of recent empirical observations. The view of reading as a parallel retrieval process that extends beyond the single word emerged with the parafoveal-on-foveal effects studied by Kennedy (1998), where an unexpected  $n + 1$  item impacted the processing of word  $n$ . Thus, to understand the reading system, it is necessary to develop reading models that process multiple words simultaneously. The OB1-reader, introduced in Snell et al. (2018d), is a parallel processing model whose development integrates recent reading research findings. OB1 is the first model to take account of both eye movement control and word identification in text reading. The model's architecture contains five key modules (see Snell et al., for a full presentation) and the focus in the present project is on the low-level information processing module. In modeling reading, the low-level module is usually a critical point because it relays information to the high-level instances in order to activate the correct word representation. The subsequent elaboration of the design then becomes essential since it conditions the rest of the system. In OB1, this module implements spatially distributed processing. Three main factors are thought to drive the visual inputs: 1) acuity, which diminishes as eccentricity increases, 2) attentional weight, which exerts control over visual inputs proportionally to the

amount of attention allocated, and 3) masking, which reflects the crowding phenomenon (see Grainger et al., 2010, Marzouki & Grainger 2014). This model has brought about significant theoretical advances, primarily by adopting two key principles: relative position letter coding and the use of spatiotopic sentence-level word representations (see Snell et al, 2018 for other implemented innovations). To a large extent, the low-level effects reported in the literature are replicated by the model. For example, the distribution of visuospatial attention is skewed toward the right (Snell & Grainger, 2018) and the model accurately simulates the spatial integration of orthographic information spanning multiple words first reported by Angele et al. (2013) and Dare and Shillcock (2013). The crucial finding is that a parallel processing system can successfully identify multiple words without making more word identification errors than skilled human readers. However, some limitations will be briefly listed below. As pointed out by the authors themselves, the model contains three main weaknesses. The first of these is the inability to recognize certain short words. This often occurs with two-letter words. The second is the inability to capture the lexical lag and successor effects seen in the eye movements of human readers (*e.g.*, Kennedy & Pynte, 2005), and the third is the tuning of the dynamic width of the attentional gradient used to determine the optimal size for the attentional window, a point that deserves further examination in the future. It is also possible to add a final point which is related more closely to the stability of the algorithm, namely that during each fixation, the visual input consists of the fixated word ( $n$ ), along with words  $n - 2$ ,  $n - 1$ ,  $n + 1$ , and  $n + 2$ , and this constraint requires empirical validation. Importantly, we emphasize here that the question of the integration of spatial information has always been studied based on human eye movement data in an attempt to account for the effects provoked by words  $n + 1$  or  $n + 2$  (*e.g.*, Kliegl et al., 2007; Rayner et al., 2007). To our knowledge, word

$n + 2$  constitutes the greatest distance from the target word that has hitherto been studied. The past experimental paradigms, analyses and conclusions may reflect a total focus on the attempt to account for the effects caused by near-to-foveal items. A systematic examination of parafoveal-on foveal effects centered on items close to the central fixated word was therefore necessary in order to answer fundamental questions relating to the interaction between the impact of the fixated word and the nature of the link with the parafoveal word (*e.g.*, Angele et al., 2013; Shotter et al., 2012). However, if a parafoveal item has an impact on identification of the fixated word, it seems important to determine its magnitude and to determine where this interaction can take place within the scope of the perceptual span. We believe that this review is necessary to ensure that effects have not been missed and believe that it could lead to improvements in the modeling of reading.

## **8.2 Pilot study**

The aim of the pilot study presented here was to illustrate how the distribution of visual attention within the limits of the perceptual span can be tracked. The task presented for the first time here will be used in the current project. This contribution could be of benefit to studies that wish to account for the way in which the spatial integration of parafoveal information is achieved. I will refer to this task as a “Flanker Task with variable eccentricity.” It is characterized by an increase in the eccentricity between the fixated target word and the parafoveal flanker words (located to the left and/or to the right of the target). The participants, material, design, procedure, and results sections are briefly described below.

*Participants.* Six French skilled readers (5 females, 1 male) from Lyon 2 University, ranging in age between 21 and 24 years, were tested. *Material.* One hundred-and-twenty frequent

French 4-letter word pairs were selected from the Manulex lexical database (Lété et al., 2004).

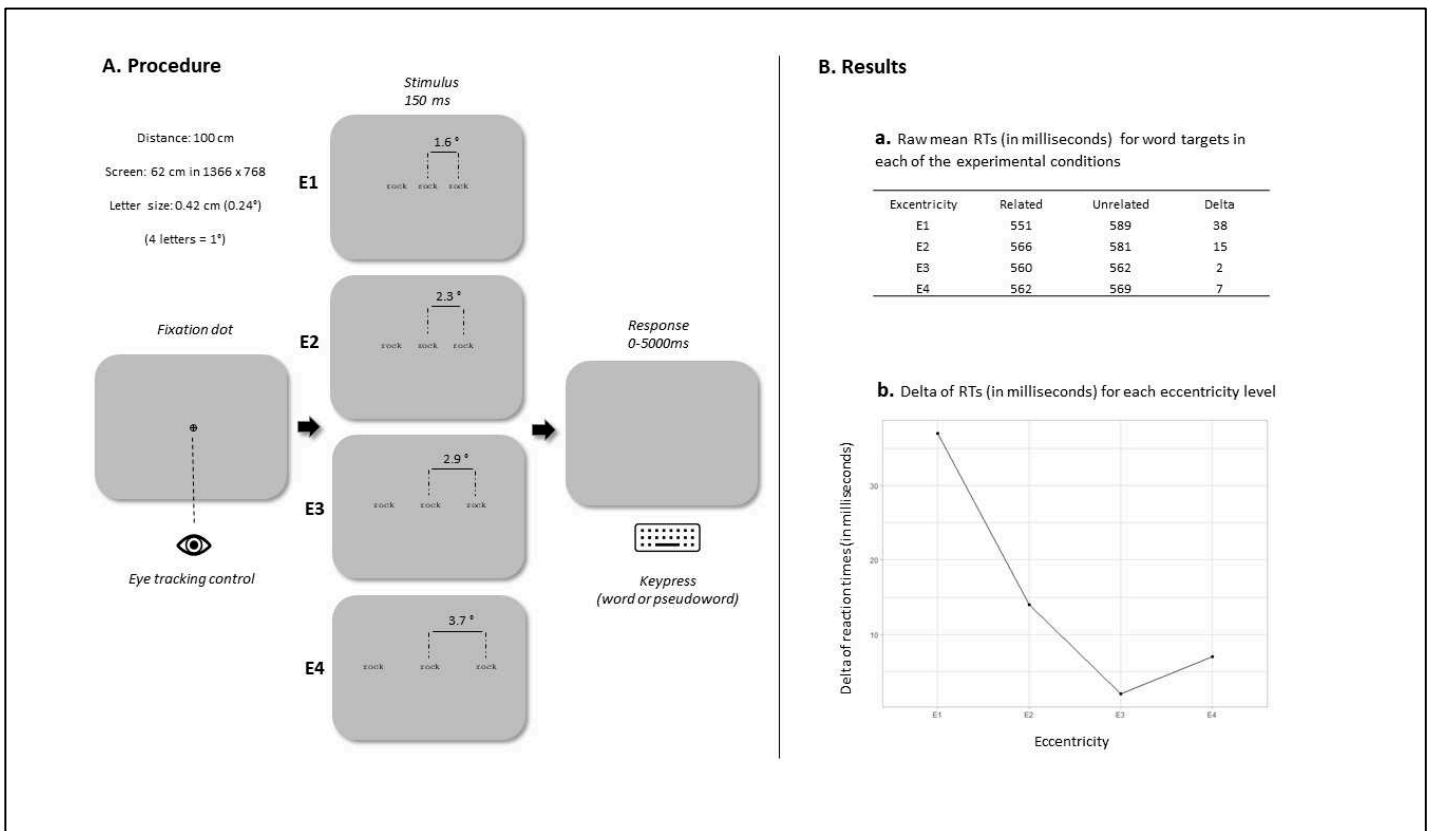
*Experimental design.* This was a 2×4 Latin square with two factors manipulating both the relatedness and the eccentricity of the flanker. The Relatedness factor was tested with two conditions in which the flanker words were the same (rock rock rock) or different from the target word (path rock path). The Eccentricity factor was tested with four conditions in which the eccentricity between the target and the flankers was gradually increased from 1.6 to 3.7 degrees of visual angle (see codes for conditions and associated eccentricities in Figure 1.A). In condition E1, the eccentricity between the target and the flanker was equal to 1.6 degrees, in E2 it was equal to 2.3 degrees, in E3 it was equal to 2.9 degrees, and in condition E4 it was equal to 3.7 degrees.

*Procedure.* The procedure is presented in Figure 1.A. The participant's right eye position was recorded with an EyeLink 1000 (SR Research, Mississauga, ON, Canada). A chin-rest was used to ensure a stable head position. When the participant's gaze landed on the central fixation dot, the target and flanking stimuli were presented for 150ms. Participants had a maximum of 5000ms to make their lexical decision (is the central stimulus a word or not). Both reaction times (RTs) and error rates were recorded and served as dependent variables in the analyses.

*Results.* Pseudowords were used to induce the response in the lexical decision task but were not included in the analysis. The trimmed raw means are presented in the Table in Figure 1.B.a and the effects of flanker relatedness (deltas: unrelated minus related) are presented in Figure 1.B.b. The error rates are not reported but did not present a trade-off with the mean RTs. Due to the evident lack of power (.14), results are restricted to the descriptive level.



The RT means show that relatedness effects decrease with eccentricity. The pattern of deltas, seen in Figure 1.B.b, can be expressed as follows:  $E1 > E2 > E3 < E4$ . This implies that relatedness effects occurred in condition E1 with an effect of 38ms. This value is in line with the 35ms effect observed in previous studies using only one space between the target and flankers words (e.g., Grainger et al., 2014; Snell & Grainger, 2018), thus attesting to the impact of relatedness on the recognition of the central word. Interestingly, at 15ms, relatedness effects were halved in the E2 condition and appeared to be null in the E3 and E4 conditions, with effects of 2 and 7ms, respectively. Further data will have to be collected in order to confirm these results.



**Figure 1.** Procedure (A) and Results (B) of the pilot study. Raw mean RTs are presented in Table (B.a) and RT deltas are plotted in (B.b).

The advantage of this paradigm lies in the fact that it tests parafoveal items that are very eccentric relative to the fixated word, while also testing their impact on the response to the central word. The main characteristic of this manipulation is that it makes it very easy to modify the location of the flankers and thus examine the processing of the central word in the presence of both 4 nearby and eccentric flankers. These pilot results revealed clear differences in parafoveal information integration as a function of eccentricity, and the relatedness effects pointed to the 2.5- degree of eccentricity as a cut-off point. It would be possible to adjust many stimulus-related factors while measuring their impact on the extent of spatial integration processing. As in visuo-attentional span tasks (*e.g.*, Bosse et al., 2009) or letter recognition tasks (*e.g.*, Geiger et al., 1992), it might be possible to specify how visual attention is distributed within the reading span. However, the two tasks cited here assume that it is possible to assess the distribution of visual attention on the basis of perceptual considerations since these tasks involve strings of letters without taking account of the features conveyed by whole words. The task proposed below sets out to assess a larger spatially distributed attention scope based on a view driven by integrative conceptions.

### **8.3 Present project**

#### **a. Objectives**

The starting point of this project comes from previous observations by Grainger et al, (2014), who considered the Flankers Task to be a reliable paradigm for studying the spatial integration of orthographic information. Relatedness effects are central in this project, having been extensively studied in our previous research (Snell et al. 2021; Cauchi et al. 2020; Cauchi et al. 2022). In this proposal, relatedness will be used to probe the extent of spatial integration. The main objective of this project is to use a Flankers Task with varying degrees

of eccentricity to report behavioral data on the low-level effects involved in word recognition. The results obtained will make it possible to come to decisions concerning the adaptations that need to be considered if these results are to be simulated using OB1-reader.

The first part of this project will consist in collecting behavioral data and the second part will consist in evaluating the model via simulations of the behavioral results. The first part will be subdivided into three subsections, while the second requires no subdivision. The first subsection will be based on the complete results of the pilot study presented above. These results will make it possible to define a distance beyond which parafoveal items no longer impact the processing of the central word. The study used in this part will take account of the distance revealed by the pilot study by manipulating relatedness effects and flanker eccentricities up to the value of this distance.

The aim of this first study will be to obtain a fine-grained quantification of the distribution of attention within the reading span on the basis of relatedness effects. The aim of the second subsection will be to determine how visual attention is distributed over the two hemifields. This coincides both with the work of Snell and Grainger (2018), as well as with ongoing work by our team. The study will manipulate relatedness effects and the eccentricities of flankers in both the left and right hemifields. The contribution of this subsection will be to permit the quantification of the distribution of visual attention in each hemifield. The results of this work could answer fundamental questions about the rightward attentional distribution bias.

The third subsection of this project will determine how stimulus complexity can affect the distribution of attention within the reading span. The study used here will consider two

factors determining complexity (word frequency and word length) by manipulating relatedness effects and 5 flanker eccentricities for each. Recent lines of research using eye-tracking methodology have provided evidence that the more difficult a currently fixated word is, the longer it takes to process the upcoming word (Kliegl et al., 2006). Other converging evidence has also indicated that the cognitive load is modulated by word complexity (Meixner et al., 2021). We believe that the new Flankers Task may be a good way to investigate this hypothesis.

Finally, all the data collected in part 1 will be used part 2. After the behavioral data analyses, it will be necessary to evaluate OB1, *i.e.*, to consider whether the algorithm has to be adapted in order to simulate the behavioral observations. The changes brought about by our previous observations could remedy the limitations of the above-mentioned model. This approach represents a logical continuation of the ideas discussed during my PhD.

## **b. Method**

As mentioned above, the first part involves the collection of behavioral data and is divided into three subsections. In Part 1, we will (a) quantify the distribution of attention within the reading span, (b) specify how attention is distributed across the hemifields, (c) test the impact of stimulus complexity on attentional distribution. Part 2 consists of the evaluation of the model and the simulations.

It should be noted that in Part 1, only adult participants will take part in the protocol. An eye tracker will be used to control the eye movements during the task. The same procedure as in the pilot will be employed and the sections below describe experimental designs used in each subsection. Additional measures will be obtained from tests of reading

and spelling ability, visual span, and working memory for each participant. Note that in the Part 1.c below, the stimulus complexity is operationalized as a combination of word frequency and word length.

*Part 1.a. Quantifying the distribution of attention within the reading span*

The experimental design will be a  $2 \times 4$  Latin square with two factors manipulating both the relatedness and the eccentricity of the flanker. Relatedness will be tested with two levels in which the flanker words are repeated (rock rock rock) or are different from the target word (path rock path). Eccentricity will be tested with four levels in which the eccentricity between the target and the flankers will be progressively increased up to the value of the distance revealed in the pilot study.

*Part 1.b. Quantifying the distribution of attention according to the hemifields*

The experimental design will be a  $3 \times 2 \times 4$  Latin square with three factors manipulating location, relatedness, and eccentricity. Location as a factor will be tested with three levels in which the flankers are repeated on the left (rock rock \_\_\_), on the right (\_\_\_rock rock) or on both sides (rock rock rock). The two levels of relatedness and the four levels of eccentricity will be tested as described in part 1.a.

*Part 1.c. Testing the impact of stimulus complexity on attentional distribution*

The experimental design will be a  $2 \times 4 \times 2 \times 4$  Latin square with four factors manipulating word frequency, word length, relatedness and the eccentricity of the flanker. Word frequency will be tested with two levels manipulating both high and low word frequency. Word length will be tested with four levels in which 2, 4, 6 and 8-letter word

conditions will be manipulated. The choice of these numbers of letters is based on reported data relating to morphological effects in the flanker task with adult participants (Cauchi et al., under revision, round 3). The two levels of relatedness and the four levels of eccentricity will be tested as described in part 1.a.

### *Part 2. Evaluation of the model and simulation*

OB1 has already been used to successfully fit simple flanker effects (Meeter et al., 2020). The data gathered in Part 1 will pose more of a challenge. OB1 contains parameters that set the distribution of attention over the visual field and its asymmetry. The data I propose to collect will provide a more stringent test of OB1's account of flanker effects as well as its current parameters for attentional width and attentional asymmetry. With this we will gain a principled account of the role attention plays in reading, which may result in changes to OB1's architecture. Martijn Meeter (VU Amsterdam, host of the project, and designer of OB1) will be a Key Advisor regarding the method to be used to make any such changes.

#### **c. Data analyses**

##### *Behavioral data*

Data will be analyzed in the R statistical computing environment (R Core Team, 2018). Statistical power estimation for each study will be estimated using the powerSim function from the simR package (Version 1.0.5; Green and MacLeod, 2016). RTs and Accuracy analyses will be analyzed using linear-mixed effects models with random effects structure for confirmatory hypotheses (Barr et al., 2013) and will be fitted with the lmer and glmer functions from the lme4 package, respectively (Version 1.1-21, Bates et al., 2014). Fixed effects significances may be determined with type III model comparisons using the Anova

function from the car package (Version 3.0-8, Fox and Weisberg, 2011), assuming a quadratic log-likelihood surface. Additional analyses such as post-hoc and follow-up analyses will be carried out using cell means coding and single df contrasts with the glht function from the multcomp package (Version 1.4-13, Hothorn et al., 2008) using the normal distribution to evaluate significance. A similar procedure used in previous studies is available at this OSF link: <https://osf.io/t5kec>.

#### **d. Expected results and their theoretical significance**

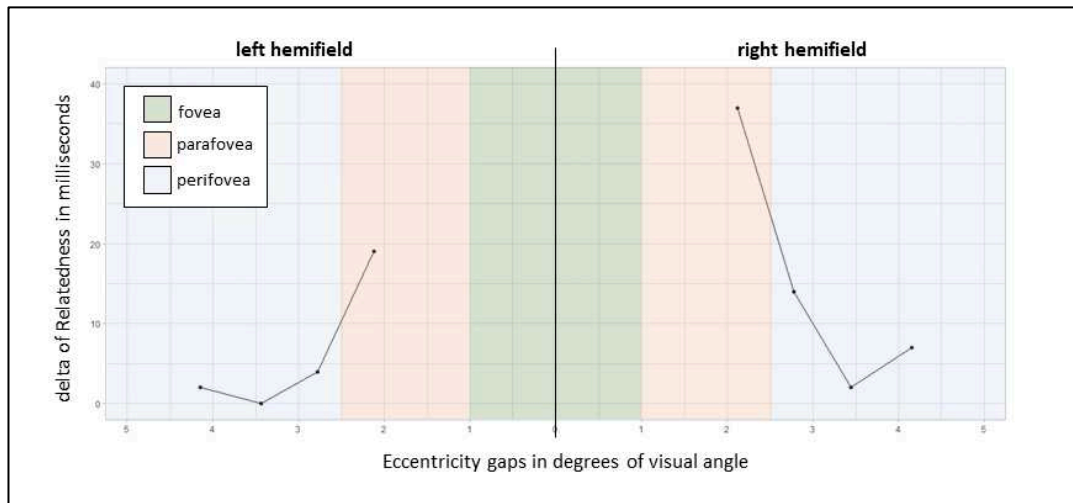
##### *Part 1.a. Quantifying the distribution of attention within the reading span*

In the experiment conducted in part 1.a, the relatedness effects should decrease with eccentricity within the reading span and subsequent analyses will model these effects. Thanks to this first step, it will be possible to determine the impact of the eccentricity of the parafoveal items on the processing of the central word by using a linear function. The most important contribution of these results will be to help us fine-tune the dynamic width of the attentional gradient used to find the optimal size of the attentional window. They may also help OB1 to capture the lexical lag and successor effects. Finally, by testing the eccentric parafoveal area, these results could help clarify the implications of restricting visual inputs to the fixated word ( $n$ ) and the words  $n - 2$ ,  $n - 1$ ,  $n + 1$ , and  $n + 2$ , or indicate if there is a need to expand this scope.

##### *Part 1.b. Quantifying the distribution of attention into each hemifield*

In the experiment conducted in part 1.b, we expect to observe decreased relatedness effects in the left compared to the right hemifield. This pattern of effects has already been described in Snell & Grainger (2018). The addition of eccentricity as a factor should permit a

new approach to quantifying these location-dependent effects and determining the distribution of attention in the two hemifields (see Figure 2 for an illustration of the expected results). In addition, these results could also help us fine-tune the skewness of the distribution of attention in OB1.



**Figure 2.** Example of a pattern of deltas as a function of the degree of visual angle for the left hemifield and the right hemifield, respectively. Current computation-based data from Cauchi, L  t   & Grainger show that relatedness effects are approximately halved in the left compared to the right hemifield.

### *Part 1.c. Testing the impact of stimulus complexity on attentional distribution*

In part 1.c, we expect relatedness effects to decrease more rapidly with increasing eccentricity when the target is more complex. Further investigations should help to identify which predictor, *i.e.*, frequency and/or length, is driving these effects. These results should also help us explain why OB1 has difficulty in recognizing short words and should enhance our knowledge of these effects.



*Part 2. Model evaluation and simulation*

We anticipate that the adjustments made to the model will enable OB1 to simulate the empirical findings. If this is indeed the case, further simulations using the OB1 -reader dataset tested in Snell et al. (2018d) as well as other datasets could be conducted to see whether the proposed adjustments significantly improve the model. These results could have major theoretical implications for models of skilled reading in general and allow us to account better for the low-level effects impacting on word recognition during text reading.

## References

- Adelman, J., Marquis, S., & Sabatos-DeVito, M. (2010). Letters in words are read simultaneously, not in left-to-right sequence. *Psychological Science, 21*, 1799-1801.
- Amenta, S., & Crepaldi, D. (2012). Morphological processing as we know it: An analytical review of morphological effects in visual word identification. *Frontiers in Psychology, 3*, 1-12.
- Amenta, S., Marelli, M., & Crepaldi, D. (2015). The fruitless effort of growing a fruitless tree: Early morpho-orthographic and morpho-semantic effects in sentence reading. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 41*, 1587–1596.
- Andrews, S. (1996). Lexical retrieval and selection processes: Effects of transposed -letter confusability. *Journal of Memory and Language, 35(6)*, 775-800.
- Angele, B., Tran, R., & Rayner, K. (2013). Parafoveal–foveal overlap can facilitate ongoing word identification during reading: Evidence from eye movements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 39(2)*, 526-538.
- Ans, B., Carbonnel, S., & Valdois, S. (1998). A connectionist multiple-trace memory model for polysyllabic word reading. *Psychological Review, 105(4)*, 678.
- Ashby, J., Rayner, K., & Clifton, C. Jr., (2005). Eye movements of highly skilled and average readers: Differential effects of frequency and predictability. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology, 58A*, 1065–1086.
- Baayen, R. (2008). Analyzing linguistic data. A practical introduction to statistics. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

- Balota, D. A., & Chumbley, J. I. (1984). Are lexical decisions a good measure of lexical access? The role of word frequency in the neglected decision stage. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *10*(3), 340-357.
- Banfi, C., Kemény, F., Gangl, M., Shulte-Körne, G., Moll, K., & Landerl, K. (2018). Visual attention span performance in German-speaking children with differential reading and spelling profiles: No evidence of group differences. *PLOS ONE*, *13*, e0198903.
- Barr, D. J., Levy, R., Scheepers, C., & Tily, H. J. (2013). Random effects structure for confirmatory hypothesis testing: Keep it maximal. *Journal of Memory and Language*, *68*, 255–278.
- Bates, D., Maechler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2014). *lme4: Linear mixed-effects models using Eigen and S4*. R package Version 1.1-6. Retrieved from <http://CRAN.R-project.org/package=lme4>.
- Bates, D., Maechler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, *67*, 1–48.
- Bélangier, N. N., Mayberry, R. I., & Rayner, K. (2013). Orthographic and phonological preview benefits: Parafoveal processing in skilled and less-skilled deaf readers. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *66*, 2237–2252.
- Beyersmann, E., Castles, A., & Coltheart, M. (2012). Morphological processing during visual word recognition in developing readers: Evidence from masked priming. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *65*, 1306–1326.

- Beyersmann, E., Grainger, J., Casalis, S., & Ziegler, J. C. (2015). Effects of reading proficiency on embedded stem priming in primary school children. *Journal of Experimental Child Psychology, 139*, 115–126.
- Beyersmann, E., Mousikou, P., Schroeder, S., Javourey-Drevet, L., Ziegler, J. C., & Grainger, J. (2021). The dynamics of morphological processing in developing readers: A cross-linguistic masked priming study. *Journal of Experimental Child Psychology, 208*, 105140.
- Beyersmann, E., Ziegler, J. C., Castles, A., Coltheart, M., Kezilas, Y., & Grainger, J. (2016). Morpho-orthographic segmentation without semantics. *Psychonomic Bulletin & Review, 23*, 533–539.
- Binder, J. R., Medler, D. A., Westbury, C. F., Liebenthal, E., & Buchanan, L. (2006). Tuning of the human left fusiform gyrus to sublexical orthographic structure. *Neuroimage, 33*(2), 739-748.
- Blythe, H. I., & Joseph, H. S. S. L. (2011). Children's eye movements during reading. In S. P. Livingsedge, I. D. Gilchrist, & S. Everling (Eds.), *Oxford handbook on eye movements* (pp. 643–662). Oxford, England: Oxford University Press.
- Blythe, H., Livingsedge, S., Joseph, H., White, S., & Rayner, K. (2009). Visual information capture during fixations in reading for children and adults. *Vision Research, 49*, 1583-1591.
- Bosse, M., Tainturier, M., & Valdois, S. (2007). Developmental dyslexia: The visual attention span deficit hypothesis. *Cognition, 104*, 198- 230.

- Bosse, M., & Valdois, S. (2009). Influence of the visual attention span on child reading performance: A cross sectional study. *Journal of Research in Reading, 32*, 230-253.
- Bosse, M. L., Valdois, S., & Dompnier, B. (2009). Acquisition du langage écrit et empan visuo-attentionnel: une étude longitudinale. In N. Marec-Breton, A. S. Besse, F. de La Haye, N. Bonneton & E. Bonjour (Eds.), *L'apprentissage de la langue écrite : approche cognitive* (pp. 167-178). Rennes: Presses Universitaires de Rennes.
- Bunge, S. A., Hazeltine, E., Scanlon, M. D., Rosen, A. C., & Gabrieli, J. D. (2002). Dissociable contributions of prefrontal and parietal cortices to response selection. *Neuroimage, 17*(3), 1562-1571.
- Brysbaert, M. (2004). The importance of interhemispheric transfer for foveal vision: A factor that has been overlooked in theories of visual word recognition and object perception. *Brain & Language, 88*, 259-267.
- Brysbaert, M., & Nazir, T. (2005). Visual constraints in written word recognition: evidence from the optimal viewing -position effect. *Journal of Research in Reading, 28*(3), 216-228.
- Brysbaert, M., & Stevens, M. (2018). Power analysis and effect size in mixed effects models: A tutorial. *Journal of Cognition, 1*(1), 1-9.
- Carpenter, P. A., & Just, M. A. (1983). What your eyes do while your mind is reading. In *Eye movements in reading* (pp. 275-307). Academic Press.
- Cattell, J. M. (1886). The influence of the intensity of the stimulus on the length of the reaction time. *Brain, 8*(4), 512-515.

- Cauchi, C., Beyersmann, E., Lété, B., & Grainger, J. (2022). A developmental perspective on morphological processing in the flankers task. *Journal of Experimental Child Psychology, 221*, 105448.
- Cauchi, C., Lété, B., & Grainger, J. (2020). Orthographic and phonological contributions to flanker effects. *Attention, Perception, & Psychophysics, 82(7)*, 3571-3580.
- Cavalli, E., Colé, P., Leloup, G., Poracchia-George, F., Sprenger-Charolles, L., & El Ahmadi, A. (2018). Screening for dyslexia in French-speaking university students: An evaluation of the detection accuracy of the Alouette test. *Journal of Learning Disabilities, 51*, 268-282.
- Chace, K. H., Rayner, K., & Well, A. D. (2005). Eye movements and phonological parafoveal preview: effects of reading skill. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale, 59(3)*, 209.
- Coltheart, M. (2005). Modeling reading: The dual-route approach. *The science of Reading: A Handbook, 6*, 23.
- Coltheart, M., & Rastle, K. (1994). Serial processing in reading aloud: Evidence for dual-route models of reading. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 20(6)*, 1197-1211.
- Coltheart, M., Rastle, K., Perry, C., Langdon, R., & Ziegler, J. (2001). DRC: a dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychological Review, 108(1)*, 204-256.

- Cousineau, D., & O'Brien, F. (2014). Error bars in within-subject designs: A comment on Baguley (2012). *Behavior Research Methods*, *46*(4), 1149-1151.
- Dann, K. M., Veldre, A., & Andrews, S. (2021). Morphological preview effects in English are restricted to suffixed words. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *47*, 1338-1352.
- Dare, N., & Shillcock, R. (2013). Serial and parallel processes in eye movement control: Current controversies and future directions. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *66*, 417-428.
- Davis, C. J. (2010). The spatial coding model of visual word identification. *Psychological Review*, *117*, 713-758.
- Davis, C. J. (1999). *The self-organising lexical acquisition and recognition (SOLAR) model of visual word recognition*. Unpublished doctoral dissertation, University of New South Wales, Australia.
- Davis, C. J., & Bowers, J. S. (2004). What do letter migration errors reveal about letter position coding in visual word recognition? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *30*(5), 923.
- Dawson, N., Rastle, K., & Ricketts, J. (2021). Finding the man amongst many: A developmental perspective on mechanisms of morphological decomposition. *Cognition*, *211*, 104605.

- Declerck, M., Snell, J., & Grainger, J. (2018). On the role of language membership information during word recognition in bilinguals: Evidence from flanker-language congruency effects. *Psychonomic Bulletin & Review*, *25*(2), 704-709.
- Dehaene, S., Cohen, L., Sigman, M., & Vinckier, F. (2005). The neural code for written words: a proposal. *Trends in Cognitive Sciences*, *9*(7), 335-341.
- Deutsch, A., & Rayner, K. (1999). Initial fixation location effects in reading Hebrew words. *Language and Cognitive Processes*, *14*(4), 393-421.
- Ducrot, S., & Grainger, J. (2007). Deployment of spatial attention to words in central and peripheral vision. *Attention, Perception & Psychophysics*, *69*(4), 578-590.
- Ducrot, S., & Pynte, J. (2002). What determines the eyes' landing position in words? *Perception & Psychophysics*, *64*(7), 1130-1144.
- Ducrot, S., Pynte, J., Ghio, A., & L  t  , B. (2013). Visual and linguistic determinants of the eyes' initial fixation position in reading development. *Acta psychologica*, *142*(3), 287-298.
- Ehri, L. C. (1992). Reconceptualizing the development of sight word reading and its relationship to recoding. In P. B. Gough, L. E. Ehri, & R. Treiman (Eds.), *Reading acquisition* (pp. 105–143). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Engbert, R., Nuthmann, A., Richter, E. M., & Kliegl, R. (2005). SWIFT: a dynamical model of saccade generation during reading. *Psychological Review*, *112*(4), 777-813.
- Eriksen, B. A., & Eriksen, C. W. (1974). Effects of noise letters upon the identification of a target letter in a nonsearch task. *Perception & Psychophysics*, *16*(1), 143-149.



- Eriksen, C. W. (1995). The flankers task and response competition: A useful tool for investigating a variety of cognitive problems. *Visual Cognition*, 2, 101–118.
- Fassbender, C., Foxe, J. J., & Garavan, H. (2006). Mapping the functional anatomy of task preparation: Priming task-appropriate brain networks. *Human Brain Mapping*, 27(10), 819-827.
- Faust, M. E., Balota, D. A., Spieler, D. H., & Ferraro, F. R. (1999). Individual differences in information-processing rate and amount: Implications for group differences in response latency. *Psychological Bulletin*, 125, 777–799.
- Ferrand, L. (2007). *Psychologie cognitive de la lecture*. Bruxelles: De Boeck.
- Ferrand, L., & Grainger, J. (1992). Phonology and orthography in visual word recognition: Evidence from masked non-word priming. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 45(3), 353-372.
- Ferrand, L., & Grainger, J. (1993). The time course of orthographic and phonological code activation in the early phases of visual word recognition. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 31(2), 119-122.
- Forster, K. I., & Davis, C. (1984). Repetition priming and frequency attenuation in lexical access. *Journal of experimental psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 10(4), 680-698.
- Fox, J., & Weisberg, S. (2011). *An R companion to applied regression* (2nd ed.). Thousand Oaks, CA: Sage.

- Frazier, L., & Rayner, K. (1982). Making and correcting errors during sentence comprehension: Eye movements in the analysis of structurally ambiguous sentences. *Cognitive Psychology, 14*, 178–210.
- Frost, R. (1998). Toward a strong phonological theory of visual word recognition: True issues and false trails. *Psychological Bulletin, 123*, 71–99.
- Frost, R., Grainger, J., & Rastle, K. (2005). Current issues in morphological processing: An introduction. *Language and Cognitive Processes, 20*(1-2), 1-5.
- Geiger, G., Cattaneo, C., Galli, R., Pozzoli, U., Facoetti, A., Lorusso, M., & Molteni, M. (2008). Wide and diffuse perceptual modes characterize dyslexics in vision and audition. *Perception, 37*, 1745–1764.
- Geiger, G., Lettvin, J. Y., & Zegarra-Moran, O. (1992). Task-determined strategies of visual process. *Cognitive Brain Research, 1*(1), 39-52.
- Gomez, P., Ratcliff, R., & Perea, M. (2008). The overlap model: A model of letter position coding. *Psychological Review, 115*, 577–601.
- Goswami, U. (2015). Visual attention span deficits and assessing causality in developmental dyslexia. *Nature Reviews Neuroscience, 16*, 225-226.
- Grainger, J. (1990). Word frequency and neighborhood frequency effects in lexical decision and naming. *Journal of Memory and Language, 29*(2), 228-244.
- Grainger, J. (2008). Cracking the orthographic code: An introduction. *Language and Cognitive Processes, 23*, 1–35.

- Grainger, J. (2018). Orthographic processing: A “mid-level” vision of reading. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *71*, 335-359.
- Grainger, J. (2022). Word Recognition I: Visual and Orthographic Processing. In M. Snowling, C. Hulme, & K. Nation (Eds), *The Science of Reading: A Handbook* (2nd ed.), (pp. 60-78), Wiley.
- Grainger, J., & Beyersmann, E. (2017). Edge-aligned embedded word activation initiates morpho-orthographic segmentation. In B. Ross (Ed.), *Psychology of learning and motivation* (pp. 285–317). Amsterdam: Elsevier Academic Press.
- Grainger, J., Colé, P., & Segui, J. (1991). Masked morphological priming in visual word recognition. *Journal of Memory and Language & Speech*, *30*, 370–384.
- Grainger, J., Diependaele, K., Spinelli, E., Ferrand, L., & Farioli, F. (2003). Masked repetition and phonological priming within and across modalities. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, *29*, 1256–1269.
- Grainger, J., Dufau, S., & Ziegler, J. C. (2016). A vision of reading. *Trends in Cognitive Sciences*, *20*(3), 171-179.
- Grainger, J., Granier, J.-P., Farioli, F., van Assche, E., & van Heuven, W. J. B. (2006). Letter position information and printed word perception: The relative-position priming constraint. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *32*, 865-884.
- Grainger, J., Lété, B., Bertrand, D., Dufau, S., & Ziegler, J. C. (2012). Evidence for multiple routes in learning to read. *Cognition*, *123*, 280–292.

- Grainger, J., Mathôt, S., & Vitu, F. (2014). Tests of a model of multiword reading: Effects of parafoveal flanking letters on foveal word recognition. *Acta Psychologica, 146*, 35–40.
- Grainger, J., O’regan, J. K., Jacobs, A. M., & Segui, J. (1989). On the role of competing word units in visual word recognition: The neighborhood frequency effect. *Perception & Psychophysics, 45(3)*, 189-195.
- Grainger, J., Snell, J., & Beyersmann, E. (2021). Morphological processing in the flankers task. *Language, Cognition and Neuroscience, 36(3)*, 288-295.
- Grainger, J., Tydgat, I., & Isselé, J. (2010). Crowding affects letters and symbols differently. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 36*, 673–688.
- Grainger, J., & van Heuven, W.J. (2003). Modeling letter position coding in printed word perception. In P. Bonin (Ed.), *The mental lexicon*. New York: Nova Science.
- Grainger, J., & van Heuven, W. J. (2004). Modeling letter position coding in printed word perception. In P. Bonin (Ed.), *The mental lexicon* (pp. 1–24). New York, NY: Nova Science Publishers.
- Grainger, J., & Ziegler, J. (2011). A dual-route approach to orthographic processing. *Frontiers in Psychology, 2*, 54.
- Green, P., & MacLeod, C. (2016). simR: An R package for power analysis of generalized linear mixed models by simulation. *Methods in Ecology and Evolution, 7*, 493–498.
- Hachmann, W., Bogaerts, L., Szmalec, A., Woumans, E., Duyck, W., & Job, R. (2014). Short-term memory for order but not for item information is impaired in development dyslexia. *Annals of Dyslexia, 64*, 121-136.

- Häikiö, T., Bertram, R., Hyönä, J., & Niemi, P. (2009). Development of the letter identity span in reading: Evidence from the eye movement moving window paradigm. *Journal of Experimental Child Psychology, 102*(2), 167-181.
- Hannagan, T., & Grainger, J. (2012). Protein analysis meets visual word recognition: A case for string kernels in the brain. *Cognitive Science, 36*(4), 575-606.
- Harms, J. & Bundesen, C. (1983). Color segregation and selective attention in a nonsearch task. *Perception & Psychophysics, 33*, 11-19.
- Hasenäcker, J., Beyersmann, E., & Schroeder, S. (2020). Morphological priming in children: Disentangling the effects of schoolgrade and reading skill. *Scientific Studies of Reading, 24*, 484-499.
- Henderson, J. M. (1992). Visual attention and eye movement control during reading and picture viewing. In *Eye movements and visual cognition* (pp. 260-283). Springer, New York, NY.
- Henderson, J. M., & Ferreira, F. (1993). Eye movement control during reading: fixation measures reflect foveal but not parafoveal processing difficulty. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue Canadienne de Psychologie Expérimentale, 47*(2), 201.
- Hommel, B. (2003). Spatial asymmetries in the flanker-congruency effect: Attentional scanning is biased by flanker orientation. *Psychology Science, 45*(1), 63-77.
- Hothorn, T., Bretz, F., & Westfall, P. (2008). Simultaneous inference in general parametric models. *Biometrical Journal, 50*, 346-363.

- Inhoff, A. W., Radach, R., Starr, M., & Greenberg, S. (2000). Allocation of visuo-spatial attention and saccade programming during reading. In *Reading as a perceptual process* (pp. 221-246). North-Holland.
- Irwin, D. E., Colcombe, A. M., Kramer, A. F., & Hahn, S. (2000). Attentional and oculomotor capture by onset, luminance and color singletons. *Vision Research, 40*(10-12), 1443-1458.
- Jackson, M., & McClelland, L. (1979). Processing determinants of reading speed. *Journal of Experimental Psychology: General, 108*, 151-181.
- Jacobs, A. M., & Grainger, J. (1992). Testing a semistochastic variant of the interactive activation model in different word recognition experiments. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 18*(4), 1174.
- Jarosz, A. F., & Wiley, J. (2014). What are the odds? A practical guide to computing and reporting Bayes factors. *The Journal of Problem Solving, 7*(1), 2.
- Joseph, H. S. S. L., Liversedge, S. P., Blythe, H. I., White, S. J., & Rayner, K. (2009). Word length and landing position effects during reading in children and adults. *Vision Research, 49*, 2078-2086.
- Katz, L., & Frost, R. (1992). Reading in different orthographies: The orthographic depth hypothesis. In R. Frost & L. Katz (Eds.), *Orthography, phonology morphology, and meaning* (pp. 67-84). Amsterdam, Netherlands: Elsevier.

- Kennedy, A. (1998). *The influence of parafoveal words on foveal inspection time: Evidence for a processing trade-off*. In *Eye guidance in reading and scene perception* (pp. 149-179). Elsevier Science Ltd.
- Kennedy, A., & Pynte, J. (2005). Parafoveal-on-foveal effects in normal reading. *Vision Research, 45*(2), 153-168.
- Kennedy, A., Pynte, J., & Ducrot, S. (2002). Parafoveal-on-foveal interactions in word recognition. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology: Section A, 55*(4), 1307-1337.
- Keuleers, E., & Brysbaert, M. (2010). Wuggy: A multilingual pseudoword generator. *Behavior Research Methods 42*, 627-633.
- Khelifi, R., Sparrow, L., & Casalis, S. (2015). Third and fifth graders' processing of parafoveal information in reading: A study in single-word recognition. *Journal of Experimental Child Psychology, 139*, 1-17.
- Khelifi, R., Sparrow, L., & Casalis, S. (2017). Are the final letters of a parafoveal word used by developing readers? Evidence from a single word reading task. *Cognitive Development, 41*, 65-72.
- Kliegl, R., Nuthmann, A., & Engbert, R. (2006). Tracking the mind during reading: The influence of past, present, and future words on fixation durations. *Journal of Experimental Psychology: General, 135*(1), 12-35.

- Kliegl, R., Risse, S., & Laubrock, J. (2007). Preview benefit and parafoveal-on-foveal effects from word  $n+2$ . *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *33*(5), 1250.
- Klein, C., & Foerster, F. (2001). Development of prosaccade and antisaccade task performance in participants ages 6 to 26 years. *Psychophysiology*, *38*, 179–189.
- Kwon, M., Legge, G., & Dubbels, B. (2007). Developmental changes in the visual span for reading. *Vision Research*, *47*, 2889-2900.
- Laubrock, J., & Kliegl, R. (2018). *EyetrackR: An R package for the analysis of eye movement data*. Retrieved from [http://read.psych.unipotsdam.de/index.php?option=com\\_content&view=article&id=43:eyetrackr&catid=13:r-playground&Itemid=15](http://read.psych.unipotsdam.de/index.php?option=com_content&view=article&id=43:eyetrackr&catid=13:r-playground&Itemid=15)
- Lázaro, M., Illera, V., Acha, J., Escalonilla, A., García, S., & Sainz, J. S. (2018). Morphological effects in word identification: Tracking the developmental trajectory of derivational suffixes in Spanish. *Reading and Writing*, *31*, 1669–1684.
- Lee, M. D., & Wagenmakers, E. J. (2013). *Bayesian cognitive modeling: A practical course*. Cambridge, England: Cambridge University Press.
- Lefavrais, P. (1967). *Test de l'Alouette: Manuel*. Paris: Les éditions du Centre de psychologie appliquée.
- Lété, B., & Fayol, M. (2013). Substituted-letter and transposed-letter effects in a masked priming paradigm with French developing readers and dyslexics. *Journal of Experimental Child Psychology*, *114*, 47–62.



- Lété, B., Sprenger-Charolles, L., & Colé, P. (2004). MANULEX: A grade-level lexical database from French elementary school readers. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, *36*(1), 156-166.
- Lindgren, M., Stenberg, G., & Rosén, I. (1996). Effects of nicotine in visual attention tasks. *Human Psychopharmacology: Clinical and Experimental*, *11*(1), 47-51.
- Longtin, C. M., Segui, J., & Hallé, P. A. (2003). Morphological priming without morphological relationship. *Language and Cognitive Processes*, *18*, 313–334.
- Lukatela, G., & Turvey, M. T. (1994). Visual lexical access is initially phonological: 2. Evidence from phonological priming by homophones and pseudohomophones. *Journal of Experimental Psychology: General*, *123*, 331–353.
- Marzouki, Y., & Grainger, J. (2014). Effects of stimulus duration and inter-letter spacing on letter-in-string identification. *Acta Psychologica*, *148*, 49 –55.
- Mathôt, S., Schreij, D., & Theeuwes, J. (2012). OpenSesame: An opensource, graphical experiment builder for the social sciences. *Behavior Research Methods*, *44*, 314–324.
- Mathôt, S., & van der Stigchel, S. (2015). New light on the mind's eye: The pupillary light response as active vision. *Current Directions in Psychological Science*, *24*, 374-378.
- Marx, C., Hawelka, S., Schuster, S., & Hutzler, F. (2015). An incremental boundary study on parafoveal preprocessing in children reading aloud: Parafoveal masks overestimate the preview benefit. *Journal of Cognitive Psychology*, *27*(5), 549-561.

- Marelli, M., & Luzzatti, C. (2012). Frequency effects in the processing of Italian nominal compounds: Modulation of headedness and semantic transparency. *Journal of Memory & Language*, 66, 644–664.
- McClelland, J. L., & Mozer, M. C. (1986). Perceptual interactions in two-word displays: familiarity and similarity effects. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 12(1), 18.
- McClelland, J. L., & Rumelhart, D. E. (1981). An interactive activation model of context effects in letter perception: 1. An account of basic findings. *Psychological Review*, 88, 375-407.
- McConkie, G. W., & Rayner, K. (1975). The span of the effective stimulus during a fixation in reading. *Perception & Psychophysics*, 17(6), 578-586.
- McConkie, G. W., Zola, D., Grimes, J., Kerr, P. W., Bryant, N. R., & Wolff, P. M. (1991). Children's eye movements during reading. *Vision and Visual Dyslexia*, 13, 251-262.
- Meeter, M., Marzouki, Y., Avramiea, A. E., Snell, J., & Grainger, J. (2020). The Role of Attention in Word Recognition: Results from OB1-Reader. *Cognitive science*, 44(7), e12846.
- Meixner, J. M., Nixon, J. S., & Laubrock, J. (2022). The perceptual span is dynamically adjusted in response to foveal load by beginning readers. *Journal of Experimental Psychology: General*, 151(6), 1219.
- Mennes, M., Zuo, X. N., Kelly, C., Di Martino, A., Zang, Y. F., Biswal, B., ... & Milham, M. P. (2011). Linking inter-individual differences in neural activation and behavior to intrinsic brain dynamics. *Neuroimage*, 54(4), 2950-2959.

Mielliet, S., & Sparrow, L. (2004). Phonological codes are assembled before word fixation: Evidence from boundary paradigm in sentence reading. *Brain and Language, 90*, 299–310.

Milledge, S. V., Blythe, H. I., & Liversedge, S. P. (2021). Parafoveal pre-processing in children reading English: The importance of external letters. *Psychonomic Bulletin & Review, 28*(1), 197-208.

Ministère de l'Éducation nationale, de la Jeunesse et des Sports. (2020, July 30). *Le Bulletin officiel de l'Éducation nationale n°31 du 30 juillet*. Paris: République Française. [https://www.education.gouv.fr/pid285/bulletin\\_officiel.html?pid\\_bo=39771](https://www.education.gouv.fr/pid285/bulletin_officiel.html?pid_bo=39771).

Mirault, J., Yeaton, J., Broqua, F., Dufau, S., Holcomb, P. J., & Grainger, J. (2020). Parafoveal-on-foveal repetition effects in sentence reading: A co-registered eye-tracking and EEG study. *Psychophysiology, 57*(8), e13553.

Morey, R. D., & Rouder, J. N. (2018). BayesFactor: Computation of Bayes Factor for common designs (R Package Version 0.9.12-4.2) [Computer software]. Retrieved from <https://cran.r-project.org/web/packages/BayesFactor/>.

Mielliet, S., & Sparrow, L. (2004). Phonological codes are assembled before word fixation: Evidence from boundary paradigm in sentence reading. *Brain and Language, 90*(1-3), 299-310.

Mol, S. E., & Bus, A. G. (2011). To read or not to read: a meta-analysis of print exposure from infancy to early adulthood. *Psychological Bulletin, 137*(2), 267.

- Morey, R. D., & Rouder, J. N. (2018). BayesFactor: Computation of Bayes Factor for common designs (R Package Version 0.9.12-4.2) [Computer software]. Retrieved from <https://cran.r-project.org/web/packages/BayesFactor/>.
- Mozer, M. C. (1983). Letter migration in word perception. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *9*(4), 531.
- Mozer, M. C. (1987). *Early parallel processing in reading: A connectionist approach*. Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Neuhaus, G., Foorman, B., Francis, D., & Carlson, C. (2001). Measures of information processing in rapid automatized naming (RAN) and their relation to reading. *Journal of Experimental Child Psychology*, *78*, 359-373.
- Norris, D. (1994). Shortlist: A connectionist model of continuous speech recognition. *Cognition*, *52*(3), 189-234.
- Norris, D. (2006). The Bayesian reader: Explaining word recognition as an optimal Bayesian decision process. *Psychological Review*, *113*, 327-357.
- O'Regan, J. K., Lévy-Schoen, A., Pynte, J., & Brugailière, B. É. (1984). Convenient fixation location within isolated words of different length and structure. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *10*(2), 250.
- Pagán, A., Blythe, H., & Liversedge, S. (2016). Parafoveal preprocessing of word initial trigrams during reading in adults and children. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, *42*, 411-432.

- Perea, M., & Carreiras, M. (2006). Do transposed-letter similarity effects occur at a syllable level? *Experimental Psychology*, *53*(4), 308.
- Perea, M., & Lupker, S. J. (2004). Can CANISO activate CASINO? Transposed-letter similarity effects with nonadjacent letter positions. *Journal of Memory and Language*, *51*(2), 231-246.
- Peressotti, F., & Grainger, J. (1999). The role of letter identity and letter position in orthographic priming. *Perception & Psychophysics*, *61*(4), 691-706.
- Perfetti, C. A. (2007). Reading ability: Lexical quality to comprehension. *Scientific Studies of Reading*, *11*, 357-383.
- Perfetti, C. A., & Bell, L. (1991). Phonemic activation during the first 40 ms of word identification: Evidence from backward masking and priming. *Journal of Memory and Language*, *30*(4), 473-485.
- Perry, C., Ziegler, J. C., & Zorzi, M. (2007). Nested incremental modeling in the development of computational theories: The CDP+ model of reading aloud. *Psychological Review*, *114*, 273-315.
- Plaut, D. C., McClelland, J. L., Seidenberg, M. S., & Patterson, K. (1996). Understanding normal and impaired word reading: Computational principles in quasi-regular domains. *Psychological Review*, *103*, 56-115.
- Pollatsek, A., Lesch, M., Morris, R. K., & Rayner, K. (1992). Phonological codes are used in integrating information across saccades in word identification and reading. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *18*(1), 148-162.

- Pollatsek, A., Reichle, E. D., & Rayner, K. (2003). Modeling eye movements in reading: Extensions of the E-Z Reader model. In J. Hyönä, R. Radach, & H. Deubel (Eds.), *The mind's eyes: Cognitive and applied aspects of oculomotor research* (pp. 361–390). Oxford, England: Elsevier.
- Pollatsek, A., Reichle, E. D., & Rayner, K. (2006). Tests of the E-Z Reader model: Exploring the interface between cognition and eye-movement control. *Cognitive Psychology*, *52*, 1–56.
- Quémart, P., Casalis, S., & Colé, P. (2011). The role of form and meaning in the processing of written morphology: A priming study in French developing readers. *Journal of Experimental Child Psychology*, *109*, 478–496.
- R Core Team. (2018). R: A language environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Retrieved from <https://www.R-project.org/>
- RStudio Team (2022). RStudio: Integrated Development Environment for R. RStudio, PBC, Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>.
- Rafal, R., Gershberg, F., Egly, R., Ivry, R., Kingstone, A., & Ro, T. (1996). Response channel activation and the lateral prefrontal cortex. *Neuropsychologia*, *34*(12), 1197-1202.
- Rastle, K. (2019). The place of morphology in learning to read in English. *Cortex*, *116*, 45–54.
- Rastle, K., & Brysbaert, M. (2006). Masked phonological priming effects in English: Are they real? Do they matter? *Cognitive Psychology*, *53*(2), 97-145.

- Rastle, K., & Davis, M. H. (2008). Morphological decomposition based on the analysis of orthography. *Language & Cognitive Processes, 23*, 942–971.
- Rastle, K., Davis, M. H., & New, B. (2004). The broth in my brother's brothel: Morpho-orthographic segmentation in visual word recognition. *Psychonomic Bulletin & Review, 11*, 1090–1098.
- Rayner, K. (1975). The perceptual span and peripheral cues in reading. *Cognitive Psychology, 7*(1), 65-81.
- Rayner, K. (1986). Eye movements and the perceptual span in beginning and skilled readers. *Journal of Experimental Child Psychology, 41*(2), 211-236.
- Rayner, K. (1995). Eye movements and cognitive processes in reading, visual search, and scene perception. In *Studies in Visual Information Processing* (Vol. 6, pp. 3- 22). North-Holland.
- Rayner, K. (1998). Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. *Psychological Bulletin, 124*, 372-422.
- Rayner, K., Fischer, M. H., & Pollatsek, A. (1998). Unspaced text interferes with both word identification and eye movement control. *Vision Research, 38*(8), 1129-1144.
- Rayner, K., & McConkie, G. W. (1976). What guides a reader's eye movements? *Vision Research, 16*(8), 829-837.
- Rayner, K., Juhasz, B. J., & Brown, S. J. (2007). Do readers obtain preview benefit from word N+ 2? A test of serial attention shift versus distributed lexical processing models of

eye movement control in reading. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 33(1), 230.

Reicher, G. M. Perceptual recognition as a function of meaningfulness of stimulus material. *Journal of Experimental Psychology*, 1969, 81, 274-280.

Reichle, E. D., Liversedge, S. P., Drieghe, D., Blythe, H. I., Joseph, H. S., White, S. J., & Rayner, K. (2013). Using EZ Reader to examine the concurrent development of eye-movement control and reading skill. *Developmental Review*, 33(2), 110-149.

Reichle, E., Liversedge, S., Pollatsek, A., & Rayner, K. (2009). Encoding multiple words simultaneously in reading is implausible. *Trends in Cognitive Sciences*, 13, 115-119.

Reichle, E. D., Pollatsek, A., Fisher, D. L., & Rayner, K. (1998). Toward a model of eye movement control in reading. *Psychological Review*, 105, 125-157.

Reichle, E. D., Pollatsek, A., & Rayner, K. (2006). E-Z Reader: A cognitive-control, serial-attention model of eye-movement control during reading. *Cognitive Systems Research*, 7, 4-22.

Reichle, E. D., Rayner, K., & Pollatsek, A. (1999). Eye movement control in reading: Accounting for initial fixation locations and refixations within the EZ Reader model. *Vision Research*, 39(26), 4403-4411.

Reichle, E. D., Rayner, K., & Pollatsek, A. (2003). The EZ Reader model of eye-movement control in reading: Comparisons to other models. *Behavioral and Brain Sciences*, 26(4), 445-476.



- Reilly, R. G., & Radach, R. (2006). Some empirical tests of an interactive activation model of eye movement control in reading. *Cognitive Systems Research, 7*(1), 34-55.
- Schiff, R., Raveh, M., & Fighel, A. (2012). The development of the Hebrew mental lexicon: When morphological representations become devoid of their meaning. *Scientific Studies of Reading, 16*, 383-403.
- Schilling, H. E. H., Rayner, K., & Chumbley, J. I. (1998). Comparing naming, lexical decision, and eye fixation times: Word frequency effects and individual differences. *Memory & Cognition, 26*, 1270-1281.
- Schotter, E. R., Angele, B., & Rayner, K. (2012). Parafoveal processing in reading. *Attention, Perception, & Psychophysics, 74*(1), 5-35.
- Schotter, E. R. & Payne, B. R. (2019). Eye movements and comprehension are important to reading. *Trends in Cognitive Sciences, 23*, 811-812.
- Seabra, A., Dias, N., Mecca, T., & Macedo, E. (2017). Contribution of word reading speed to reading comprehension in Brazilian children: Does speed matter to the comprehension model? *Frontiers in Psychology, 8*, 630.
- Seidenberg, M. S., & McClelland, J. L. (1989). A distributed, developmental model of word recognition and naming. *Psychological Review, 96*, 523-568.
- Seidenberg, M. S., & McClelland, J. L. (1989). A distributed, developmental model of word recognition and naming. *Psychological Review, 96*(4), 523.
- Shallice, T., Warrington, E. K., & McCarthy, R. (1983). Reading without semantics. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A, 35*(1), 111-138.

- Share, D. L. (1995). Phonological recoding and self-teaching: Sine qua non of reading acquisition. *Cognition*, *55*, 151–218.
- Share, D. L. (1995). Phonological recoding and self-teaching: Sine qua non of reading acquisition. *Cognition*, *55*, 151–218.
- Snell, J., Bertrand, D., & Grainger, J. (2018b). Parafoveal letter-position coding in reading. *Memory & Cognition*, *46*(4), 589-599.
- Snell, J., Bertrand, D., Meeter, M., & Grainger, J. (2018a). Integrating orthographic information across time and space. *Experimental Psychology*, *65*, 32-39.
- Snell, J., Cauchi, C., Grainger, J., & Lété, B. (2021). Attention extends beyond single words in beginning readers. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *83*(1), 238-246.
- Snell, J., Declerck, M., & Grainger, J. (2018e). Parallel semantic processing in reading revisited: Effects of translation equivalents in bilingual readers. *Language, Cognition and Neuroscience*, *33*(5), 563-574.
- Snell, J., & Grainger, J. (2018). Parallel word processing in the flanker paradigm has a rightward bias. *Attention, Perception & Psychophysics*, *80*, 1512-1519.
- Snell, J., & Grainger, J. (2019b). Consciousness is not key in the serial versus-parallel debate. *Trends in Cognitive Sciences*, *23*, 814-815.
- Snell, J., & Grainger, J. (2019a). Readers are parallel processors. *Trends in Cognitive Sciences*, *23*(7), 537-546.
- Snell, J., Mathôt, S., Mirault, J. & Grainger, J. (2018c). Parallel graded attention in reading: A pupillometric study. *Scientific Reports*, *8*,

- Snell, J., Meade, G., Meeter, M., Holcomb, P., & Grainger, J. (2019). An electrophysiological investigation of orthographic spatial integration in reading. *Neuropsychologia*, *129*, 276-283.
- Snell, J., Meeter, M., & Grainger, J. (2017). Evidence for simultaneous syntactic processing of multiple words during reading. *PLOS ONE*, *12*, e0173720.
- Snell, J., van Leipsig, S., Grainger, J., & Meeter, M. (2018d). OB1-reader: A model of word recognition and eye movements in text reading. *Psychological Review*, *125*(6), 969-984.
- Snell, J., Vitu, F., & Grainger, J. (2017). Integration of parafoveal orthographic information during foveal word reading: beyond the sub-lexical level? *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *70*(10), 1984-1996.
- Sperlich, A., Meixner, J., & Laubrock, J. (2016). Development of the perceptual span in reading: A longitudinal study. *Journal of Experimental Child Psychology*, *146*, 181-201.
- Sperlich, A., Schad, D., & Laubrock, J. (2015). When preview information starts to matter: Development of the perceptual span in German beginning readers. *Journal of Cognitive Psychology*, *27*, 511-530.
- Sprenger-Charolles, L., Colé, P. (2015). *Lecture et dyslexie: approche cognitive*. Dunod.
- Stanovich, K. E. (1986). Matthew effects in reading: Some consequences of individual differences in the acquisition of literacy. *Reading Research Quarterly*, *21*(4), 360-407.

- Stede, M., & Neumann, A. (2014, May). Potsdam commentary corpus 2.0: Annotation for discourse research. In *Proceedings of the Ninth International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC'14)* (pp. 925-929).
- Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology, 18*(6), 643.
- Tydgat, I., & Grainger, J. (2009). Serial position effects in the identification of letters, digits, and symbols. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 35*(2), 480.
- Tiffin-Richards, S., & Schroeder, S. (2015). Word length and frequency effects on children's eye movements during silent reading. *Vision Research, 113*, 33-43.
- Tiffin-Richards, S. P., & Schroeder, S. (2015). Children's and adults' parafoveal processes in German: Phonological and orthographic effects. *Journal of Cognitive Psychology, 27*(5), 531-548.
- Theeuwes, J. (1991). Exogenous and endogenous control of attention: The effect of visual onsets and offsets. *Perception & Psychophysics, 49*(1), 83-90.
- Van Assche, E., & Grainger, J. (2006). A study of relative-position priming with superset primes. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 32*(2), 399.
- van Heuven, W. J., Mandera, P., Keuleers, E., & Brysbaert, M. (2014). SUBTLEX-UK: A new and improved word frequency database for British English. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology, 67*, 1176-1190.

- Van Veen, V., Cohen, J. D., Botvinick, M. M., Stenger, V. A., & Carter, C. S. (2001). Anterior cingulate cortex, conflict monitoring, and levels of processing. *Neuroimage*, *14*(6), 1302-1308.
- Vandendaele, A., Declerck, M., Grainger, J., & Snell, J. (2020). How readers process syntactic input depends on their goals. *Acta Psychologica*, *203*, 103006.
- Vasilev, M. R., Yates, M., & Slattery, T. (2019). Do readers integrate phonological codes across saccades? A Bayesian meta-analysis and a survey of the unpublished literature. *Journal of Cognition*, *2*(1):43, 1–29.
- Veldre, A., & Andrews, S. (2015). Parafoveal lexical activation depends on skilled reading proficiency. *Journal of Experimental Psychology: Learning Memory and Cognition*, *41*, 586-595.
- Vitu, F., Brysbaert, M., & Lancelin, D. (2004). A test of parafoveal-on-foveal effects with pairs of orthographically related words. *European Journal of Cognitive Psychology*, *16*(1-2), 154-177.
- Wagenmakers, E. J. (2007). A practical solution to the pervasive problems of p values. *Psychonomic Bulletin & Review*, *14*(5), 779-804.
- Warren, T., & McConnell, K. (2007). Disentangling the effects of selectional restriction violations and plausibility violation severity on eye-movements in reading. *Psychonomic Bulletin & Review*, *14*, 770–775.
- White, A., Boynton, G., Yeatman, J. (2019a). The link between reading ability and visual spatial attention across reading development. *Cortex*, *121*, 44-59.

- White, A. L., Boynton, G. M., & Yeatman, J. D. (2019). You can't recognize two words simultaneously. *Trends in Cognitive Sciences*, *23*, 812–814.
- Whitney, C. (2001). How the brain encodes the order of letters in a printed word: The SERIOL model and selective literature review. *Psychonomic Bulletin & Review*, *8*(2), 221-243.
- Wickelgren, W. A. (1969). Auditory or articulatory coding in verbal short-term memory. *Psychological Review*, *76*(2), 232.
- Woodworth, R. S. (1938) *Experimental psychology*. New York: Holt.
- Yamada, Y., Stevens, C., Dow, M., Harn, B. A., Chard, D. J., & Neville, H. J. (2011). Emergence of the neural network for reading in five-year-old beginning readers of different levels of pre-literacy abilities: an fMRI study. *Neuroimage*, *57*(3), 704-713.
- Yarkoni, T., Balota, D., & Yap, M. (2008). Moving beyond Coltheart's N: A new measure of orthographic similarity. *Psychonomic Bulletin & Review*, *15*, 971–979.
- Ziegler, J. C., Bertrand, D., Lété, B., & Grainger, J. (2014). Orthographic and phonological contributions to reading development: Tracking developmental trajectories using masked priming. *Developmental Psychology*, *50*, 1026–1036.
- Ziegler, J. C., Perry, C., & Zorzi, M. (2014). Modelling reading development through phonological decoding and self-teaching: implications for dyslexia. *Philosophical Transactions of the Royal Society London B: Biological Sciences*, *369*, 20120397.

## Annexes

### Annexe 1 – Stimuli (mots) utilisés dans l'étude 1

Stimuli utilisés dans les 2 expériences de l'étude 1 pour chaque condition expérimentale.

| Target | Flanker / Prime Conditions |       |       |
|--------|----------------------------|-------|-------|
|        | O+P+                       | O+P-  | O-P-  |
| âgée   | âger                       | âged  | remp  |
| aîné   | aîner                      | aînej | carom |
| ainsi  | einsi                      | oinsi | jeuve |
| après  | aprai                      | aproï | veuco |
| assez  | açez                       | atez  | dilo  |
| assis  | açis                       | apis  | lepo  |
| aussi  | ossi                       | essi  | lenu  |
| avant  | avent                      | avint | corge |
| bébé   | béber                      | bében | sajoi |
| belle  | baile                      | boile | tidra |
| blanc  | blans                      | blano | sutiz |
| brin   | brein                      | bruin | osopa |
| café   | cafer                      | cafel | piulo |
| cage   | caje                       | cate  | hirm  |
| carte  | karte                      | larte | funol |
| cassé  | caçé                       | caté  | pode  |
| cause  | cauze                      | caude | groid |
| chose  | choze                      | chole | jabat |
| cinq   | cink                       | cinf  | ploj  |
| clair  | clère                      | clure | bouve |
| clef   | cler                       | clir  | pado  |
| coin   | koin                       | toin  | galm  |
| comme  | komme                      | domme | biant |
| corde  | korde                      | porde | blait |

|       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|
| côte  | caute | caote | saril |
| coup  | koup  | joup  | dati  |
| cour  | kour  | gour  | maip  |
| doigt | doix  | doir  | braf  |
| douze | douse | doure | aimbi |
| eaux  | haux  | haox  | sicy  |
| écran | ékran | ésran | tumpe |
| enfin | anfin | onfin | datu  |
| entre | antre | intre | bloic |
| envie | anvie | onvie | aphys |
| étage | étaje | étaze | fusox |
| faim  | fain  | faig  | sorl  |
| faute | fôte  | fite  | mird  |
| film  | fylm  | folm  | erat  |
| forêt | forai | forau | lapas |



## Annexe 2 – Stimuli (mots) utilisés dans l'étude 2

Stimuli utilisés dans l'étude 2 en fonction de la condition expérimentale.

| Target | Flanker | Bigram     |            |            | Whole word     |           |                |
|--------|---------|------------|------------|------------|----------------|-----------|----------------|
|        |         | repetition | switched   | unrelated  | repetition     | no flanke | unrelated      |
| abri   | muet    | ab abri ri | ri abri ab | mu abri et | abri abri abri | abri      | muet abri muet |
| agir   | cent    | ag agir ir | ir agir ag | ce agir nt | agir agir agir | agir      | cent agir cent |
| aide   | mort    | ai aide de | de aide ai | mo aide rt | aide aide aide | aide      | mort aide mort |
| aise   | thon    | ai aise se | se aise ai | th aise on | aise aise aise | aise      | thon aise thon |
| ange   | rhum    | an ange ge | ge ange an | rh ange um | ange ange ange | ange      | rhum ange rhum |
| arme   | foin    | ar arme me | me arme ar | fo arme in | arme arme arme | arme      | foin arme foin |
| aube   | porc    | au aube be | be aube au | po aube rc | aube aube aube | aube      | porc aube porc |
| auto   | ciel    | au auto to | to auto au | ci auto el | auto auto auto | auto      | ciel auto ciel |
| avec   | nous    | av avec ec | ec avec av | no avec us | avec avec avec | avec      | nous avec nous |
| bain   | tuer    | ba bain in | in bain ba | tu bain er | bain bain bain | bain      | tuer bain tuer |
| beau   | gros    | be beau au | au beau be | gr beau os | beau beau beau | beau      | gros beau gros |
| bien   | star    | bi bien en | en bien bi | st bien ar | bien bien bien | bien      | star bien star |
| bond   | rime    | bo bond nd | nd bond bo | ri bond me | bond bond bond | bond      | rime bond rime |
| bord   | tige    | bo bord rd | rd bord bo | ti bord ge | bord bord bord | bord      | tige bord tige |
| boue   | mari    | bo boue ue | ue boue bo | ma boue ri | boue boue boue | boue      | mari boue mari |
| bout   | cinq    | bo bout ut | ut bout bo | ci bout nq | bout bout bout | bout      | cinq bout cinq |
| bref   | paix    | br bref ef | ef bref br | pa bref ix | bref bref bref | bref      | paix bref paix |
| cage   | nord    | ca cage ge | ge cage ca | no cage rd | cage cage cage | cage      | nord cage nord |
| camp   | sien    | ca camp mp | mp camp ca | si camp en | camp camp camp | camp      | sien camp sien |
| cape   | unir    | ca cape pe | pe cape ca | un cape ir | cape cape cape | cape      | unir cape unir |
| case   | four    | ca case se | se case ca | fo case ur | case case case | case      | four case four |
| cela   | soir    | ce cela la | la cela ce | so cela ir | cela cela cela | cela      | soir cela soir |
| cerf   | sain    | ce cerf rf | rf cerf ce | sa cerf in | cerf cerf cerf | cerf      | sain cerf sain |
| chef   | part    | ch chef ef | ef chef ch | pa chef rt | chef chef chef | chef      | part chef part |
| chez   | bois    | ch chez ez | ez chez ch | bo chez is | chez chez chez | chez      | bois chez bois |
| clef   | rang    | cl clef ef | ef clef cl | ra clef ng | clef clef clef | clef      | rang clef rang |
| code   | aigu    | co code de | de code co | ai code gu | code code code | code      | aigu code aigu |
| coin   | peau    | co coin in | in coin co | pe coin au | coin coin coin | coin      | peau coin peau |
| cube   | ravi    | cu cube be | be cube cu | ra cube vi | cube cube cube | cube      | ravi cube ravi |
| cuir   | mets    | cu cuir ir | ir cuir cu | me cuir ts | cuir cuir cuir | cuir      | mets cuir mets |
| dame   | fil     | da dame me | me dame da | fi dame ls | dame dame dame | dame      | fil dame fil   |
| dans   | pour    | da dans ns | ns dans da | po dans ur | dans dans dans | dans      | pour dans pour |
| date   | houx    | da date te | te date da | ho date ux | date date date | date      | houx date houx |
| demi   | sort    | de demi mi | mi demi de | so demi rt | demi demi demi | demi      | sort demi sort |
| deux   | voir    | de deux ux | ux deux de | vo deux ir | deux deux deux | deux      | voir deux voir |
| dieu   | pont    | di dieu eu | eu dieu di | po dieu nt | dieu dieu dieu | dieu      | pont dieu pont |
| dire   | plus    | di dire re | re dire di | pl dire us | dire dire dire | dire      | plus dire plus |

|      |      |            |            |               |                |      |                |
|------|------|------------|------------|---------------|----------------|------|----------------|
| donc | pays | do donc nc | nc donc do | pa donc ys    | donc donc donc | donc | pays donc pays |
| drap | onze | dr drap ap | ap drap dr | on drap ze    | drap drap drap | drap | onze drap onze |
| dune | oral | du dune ne | ne dune du | or dune al    | dune dune dune | dune | oral dune oral |
| face | brun | fa face ce | ce face fa | br face un    | face face face | face | brun face brun |
| faim | cour | fa faim im | im faim fa | co faim ur    | faim faim faim | faim | cour faim cour |
| fait | rose | fa fait it | it fait fa | ro fait se    | fait fait fait | fait | rose fait rose |
| faux | gris | fa faux ux | ux faux fa | gr faux is    | faux faux faux | faux | gris faux gris |
| fier | clou | fi fier er | er fier fi | cl fier ou    | fier fier fier | fier | clou fier clou |
| film | cher | fi film lm | lm film fi | ch film er    | film film film | film | cher film cher |
| fond | lait | fo fond nd | nd fond fo | la fond it    | fond fond fond | fond | lait fond lait |
| fort | bleu | fo fort rt | rt fort fo | bl fort eu    | fort fort fort | fort | bleu fort bleu |
| fuir | base | fu fuir ir | ir fuir fu | ba fuir se    | fuir fuir fuir | fuir | base fuir base |
| gare | soin | ga gare re | re gare ga | so gare in    | gare gare gare | gare | soin gare soin |
| gras | menu | gr gras as | as gras gr | me gras nu    | gras gras gras | gras | menu gras menu |
| grue | paon | gr grue ue | ue grue gr | pa grue on    | grue grue grue | grue | paon grue paon |
| hier | sauf | hi hier er | er hier hi | sa hier uf    | hier hier hier | hier | sauf hier sauf |
| hors | cave | ho hors rs | rs hors ho | ca hors ve    | hors hors hors | hors | cave hors cave |
| joie | plan | jo joie ie | ie joie jo | pl joie an    | joie joie joie | joie | plan joie plan |
| joue | avis | jo joue ue | ue joue jo | av joue is    | joue joue joue | joue | avis joue avis |
| jour | chat | jo jour ur | ur jour jo | ch jour at    | jour jour jour | jour | chat jour chat |
| judo | file | ju judo do | do judo ju | fi judo le    | judo judo judo | judo | file judo file |
| juge | stop | ju juge ge | ge juge ju | st juge op    | juge juge juge | juge | stop juge stop |
| jupe | soit | ju jupe pe | pe jupe ju | so jupe it    | jupe jupe jupe | jupe | soit jupe soit |
| lame | truc | la lame me | me lame la | tr lame uc    | lame lame lame | lame | truc lame truc |
| lave | crin | la lave ve | ve lave la | cr lave in    | lave lave lave | lave | crin lave crin |
| leur | fois | le leur ur | ur leur le | fo leur is    | leur leur leur | leur | fois leur fois |
| lieu | gant | li lieu eu | eu lieu li | ga lieu nt    | lieu lieu lieu | lieu | gant lieu gant |
| loin | bras | lo loin in | in loin lo | br loin as    | loin loin loin | loin | bras loin bras |
| loup | vert | lo loup up | up loup lo | ve loup rt    | loup loup loup | loup | vert loup vert |
| main | seul | ma main in | in main ma | se main ul    | main main main | main | seul main seul |
| mais | quel | ma mais is | is mais ma | qu mais el    | mais mais mais | mais | quel mais quel |
| mare | juin | ma mare re | re mare ma | ju mare in    | mare mare mare | mare | juin mare juin |
| miel | roux | mi miel el | el miel mi | ro miel ux    | miel miel miel | miel | roux miel roux |
| mien | lors | mi mien en | en mien mi | lo mien rs    | mien mien mien | mien | lors mien lors |
| mine | bloc | mi mine ne | ne mine mi | bl mine oc    | mine mine mine | mine | bloc mine bloc |
| mise | azur | mi mise se | se mise mi | az mise ur    | mise mise mise | mise | azur mise azur |
| mode | sang | mo mode de | de mode mo | sa mode<br>ng | mode mode mode | mode | sang mode sang |
| mois | lune | mo mois is | is mois mo | lu mois ne    | mois mois mois | mois | lune mois lune |
| mule | faon | mu mule le | le mule mu | fa mule on    | mule mule mule | mule | faon mule faon |
| nage | loir | na nage ge | ge nage na | lo nage ir    | nage nage nage | nage | loir nage loir |
| Noir | vase | no noir ir | ir noir no | va noir se    | noir noir noir | noir | vase noir vase |
| Note | prix | no note te | te note no | pr note ix    | note note note | note | prix note prix |
| Ogre | vain | og ogre re | re ogre og | va ogre in    | ogre ogre ogre | ogre | vain ogre vain |

|      |      |            |            |            |                |      |                |
|------|------|------------|------------|------------|----------------|------|----------------|
| Oser | taxi | os oser er | er oser os | ta oser xi | oser oser oser | oser | taxi oser taxi |
| pain | trou | pa pain in | in pain pa | tr pain ou | pain pain pain | pain | trou pain trou |
| parc | kilo | pa parc rc | rc parc pa | ki parc lo | parc parc parc | parc | kilo parc kilo |
| peur | dont | pe peur ur | ur peur pe | do peur nt | peur peur peur | peur | dont peur dont |
| pied | haut | pi pied ed | ed pied pi | ha pied ut | pied pied pied | pied | haut pied haut |
| pile | mars | pi pile le | le pile pi | ma pile rs | pile pile pile | pile | mars pile mars |
| plat | doux | pl plat at | at plat pl | do plat ux | plat plat plat | plat | doux plat doux |
| poil | neuf | po poil il | il poil po | ne poil uf | poil poil poil | poil | neuf poil neuf |
| pois | date | po pois is | is pois po | da pois te | pois pois pois | pois | date pois date |
| puce | rail | pu puce ce | ce puce pu | ra puce il | puce puce puce | puce | rail puce rail |
| puis | dent | pu puis is | is puis pu | de puis nt | puis puis puis | puis | dent puis dent |
| quoi | lent | qu quoi oi | oi quoi qu | le quoi nt | quoi quoi quoi | quoi | lent quoi lent |
| rage | poli | ra rage ge | ge rage ra | po rage li | rage rage rage | rage | poli rage poli |
| rame | pion | ra rame me | me rame ra | pi rame on | rame rame rame | rame | pion rame pion |
| rien | coup | ri rien en | en rien ri | co rien up | rien rien rien | rien | coup rien coup |
| rive | saut | ri rive ve | ve rive ri | sa rive ut | rive rive rive | rive | saut rive saut |
| robe | huit | ro robe be | be robe ro | hu robe it | robe robe robe | robe | huit robe huit |
| rond | aile | ro rond nd | nd rond ro | ai rond le | rond rond rond | rond | aile rond aile |
| roue | banc | ro roue ue | ue roue ro | ba roue nc | roue roue roue | roue | banc roue banc |
| rude | golf | ru rude de | de rude ru | go rude lf | rude rude rude | rude | golf rude golf |
| ruse | laid | ru ruse se | se ruse ru | la ruse id | ruse ruse ruse | ruse | laid ruse laid |
| sage | noix | sa sage ge | ge sage sa | no sage ix | sage sage sage | sage | noix sage noix |
| sale | chou | sa sale le | le sale sa | ch sale ou | sale sale sale | sale | chou sale chou |
| seau | brin | se seau au | au seau se | br seau in | seau seau seau | seau | brin seau brin |
| sept | bouc | se sept pt | pt sept se | bo sept uc | sept sept sept | sept | bouc sept bouc |
| tard | lion | ta tard rd | rd tard ta | li tard on | tard tard tard | tard | lion tard lion |
| tien | lard | ti tien en | en tien ti | la tien rd | tien tien tien | tien | lard tien lard |
| tour | page | to tour ur | ur tour to | pa tour ge | tour tour tour | tour | page tour page |
| tube | pris | tu tube be | be tube tu | pr tube is | tube tube tube | tube | pris tube pris |
| type | soif | ty type pe | pe type ty | so type if | type type type | type | soif type soif |
| veau | mont | ve veau au | au veau ve | mo veau nt | veau veau veau | veau | mont veau mont |
| vent | joli | ve vent nt | nt vent ve | jo vent li | vent vent vent | vent | joli vent joli |
| venu | gars | ve venu nu | nu venu ve | ga venu rs | venu venu venu | venu | gars venu gars |
| vers | nuit | ve vers rs | rs vers ve | nu vers it | vers vers vers | vers | nuit vers nuit |
| vide | port | vi vide de | de vide vi | po vide rt | vide vide vide | vide | port vide port |
| vite | ours | vi vite te | te vite vi | ou vite rs | vite vite vite | vite | ours vite ours |
| voix | gens | vo voix ix | ix voix vo | ge voix ns | voix voix voix | voix | gens voix gens |
| vous | haie | vo vous us | us vous vo | ha vous ie | vous vous vous | vous | haie vous haie |
| yeux | long | ye yeux ux | ux yeux ye | lo yeux ng | yeux yeux yeux | yeux | long yeux long |
| zone | club | zo zone ne | ne zone zo | cl zone ub | zone zone zone | zone | club zone club |

## Annexe 3A – Stimuli (mots) utilisés dans l'étude 3

Stimuli (mots) utilisés dans l'étude 3 avec l'allocation des cibles et des flankers pour chaque condition expérimentale en fonction de la liste (liste 1 sur fond blanc et liste 2 sur fond gris).

| Item num | Relatedness | stem  | derived | stem-stem         | stem-derived          | derived-derived         | derived-stem        |
|----------|-------------|-------|---------|-------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------|
| 1        | REL         | ami   | amitié  | ami ami ami       | amitié ami amitié     | amitié amitié amitié    | ami amitié ami      |
|          | UNR         | large | largeur | large ami large   | largeur ami largeur   | largeur amitié largeur  | large amitié large  |
| 2        | REL         | beau  | beauté  | beau beau beau    | beauté beau beauté    | beauté beauté beauté    | beau beauté beau    |
|          | UNR         | tas   | tasser  | tas beau tas      | tasser beau tasser    | tasser beauté tasser    | tas beauté tas      |
| 3        | REL         | bon   | bonne   | bon bon bon       | bonne bon bonne       | bonne bonne bonne       | bon bonne bon       |
|          | UNR         | sport | sportif | sport bon sport   | sportif bon sportif   | sportif bonne sportif   | sport bonne sport   |
| 4        | REL         | cause | causer  | cause cause cause | causer cause causer   | causer causer causer    | cause causer cause  |
|          | UNR         | son   | sonore  | son cause son     | sonore cause sonore   | sonore causer sonore    | son causer son      |
| 5        | REL         | cave  | caverne | cave cave cave    | caverne cave caverne  | caverne caverne caverne | cave caverne cave   |
|          | UNR         | ski   | skieur  | ski cave ski      | skieur cave skieur    | skieur caverne skieur   | ski caverne ski     |
| 6        | REL         | chat  | chaton  | chat chat chat    | chaton chat chaton    | chaton chaton chaton    | chat chaton chat    |
|          | UNR         | sage  | sagesse | sage chat sage    | sagesse chat sagesse  | sagesse chaton sagesse  | sage chaton sage    |
| 7        | REL         | cri   | crier   | cri cri cri       | crier cri crier       | crier crier crier       | cri crier cri       |
|          | UNR         | sac   | sachet  | sac cri sac       | sachet cri sachet     | sachet crier sachet     | sac crier sac       |
| 8        | REL         | danse | danseur | danse danse danse | danseur danse danseur | danseur danseur danseur | danse danseur danse |
|          | UNR         | toit  | toiture | toit danse toit   | toiture danse toiture | toiture danseur toiture | toit danseur toit   |
| 9        | REL         | droit | droite  | droit droit droit | droite droit droite   | droite droite droite    | droit droite droit  |
|          | UNR         | rêve  | rêverie | rêve droit rêve   | rêverie droit rêverie | rêverie droite rêverie  | rêve droite rêve    |
| 10       | REL         | grand | grandir | grand grand grand | grandir grand grandir | grandir grandir grandir | grand grandir grand |
|          | UNR         | point | pointer | point grand point | pointer grand pointer | pointer grandir pointer | point grandir point |
| 11       | REL         | gros  | grossir | gros gros gros    | grossir gros grossir  | grossir grossir grossir | gros grossir gros   |
|          | UNR         | peur  | peureux | peur gros peur    | peureux gros peureux  | peureux grossir peureux | peur grossir peur   |
| 12       | REL         | jour  | journée | jour jour jour    | journée jour journée  | journée journée journée | jour journée jour   |
|          | UNR         | mari  | mariage | mari jour mari    | mariage jour mariage  | mariage journée mariage | mari journée mari   |
| 13       | REL         | matin | matinée | matin matin matin | literie matin literie | matinée matinée matinée | lit matinée lit     |
|          | UNR         | lit   | literie | lit matin lit     | matinée matin matinée | literie matinée literie | matin matinée matin |
| 14       | REL         | neige | neigeux | neige neige neige | neigeux neige neigeux | neigeux neigeux neigeux | neige neigeux neige |
|          | UNR         | honte | honteux | honte neige honte | honteux neige honteux | honteux neigeux honteux | honte neigeux honte |
| 15       | REL         | ours  | ourson  | ours ours ours    | ourson ours ourson    | ourson ourson ourson    | ours ourson ours    |
|          | UNR         | jet   | jeter   | jet ours jet      | jeter ours jeter      | jeter ourson jeter      | jet ourson jet      |
| 16       | REL         | part  | partie  | part part part    | partie part partie    | partie partie partie    | part partie part    |
|          | UNR         | roche | rocher  | roche part roche  | rocher part rocher    | rocher partie rocher    | roche partie roche  |

|    |     |       |         |                   |                       |                         |                     |
|----|-----|-------|---------|-------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------|
| 17 | REL | pays  | paysan  | pays pays pays    | paysan pays paysan    | paysan paysan paysan    | pays paysan pays    |
|    | UNR | flot  | flotter | flot pays flot    | flotter pays flotter  | flotter paysan flotter  | flot paysan flot    |
| 18 | REL | pêche | pêcheur | pêche pêche pêche | pêcheur pêche pêcheur | pêcheur pêcheur pêcheur | pêche pêcheur pêche |
|    | UNR | film  | filmer  | film pêche film   | filmer pêche filmer   | filmer pêcheur filmer   | film pêcheur film   |
| 19 | REL | plat  | plateau | plat plat plat    | plateau plat plateau  | plateau plateau plateau | plat plateau plat   |
|    | UNR | épine | épineux | épine plat épine  | épineux plat épineux  | épineux plateau épineux | épine plateau épine |
| 20 | REL | poule | poulet  | poule poule poule | poulet poule poulet   | poulet poulet poulet    | poule poulet poule  |
|    | UNR | dos   | dossier | dos poule dos     | dossier poule dossier | dossier poulet dossier  | dos poulet dos      |
| 21 | REL | tout  | toute   | tout tout tout    | toute tout toute      | toute toute toute       | tout toute tout     |
|    | UNR | début | débuter | début tout début  | débuter tout débiter  | débuter toute débiter   | début toute début   |
| 22 | REL | train | trainer | train train train | trainer train trainer | trainer trainer trainer | train trainer train |
|    | UNR | col   | collier | col train col     | collier train collier | collier trainer collier | col trainer col     |
| 23 | REL | vite  | vitesse | vite vite vite    | vitesse vite vitesse  | vitesse vitesse vitesse | vite vitesse vite   |
|    | UNR | bord  | bordure | bord vite bord    | bordure vite bordure  | bordure vitesse bordure | bord vitesse bord   |
| 24 | REL | vol   | voleur  | vol vol vol       | voleur vol voleur     | voleur voleur voleur    | vol voleur vol      |
|    | UNR | barre | barreau | barre vol barre   | barreau vol barreau   | barreau voleur barreau  | barre voleur barre  |

## Annexe 3B – Tableaux de synthèse des ANOVA de l'étude 3

Tableaux de synthèse des Analyses de Variance inter-groupes pour les TRs et pour la précision.

| Cycle 2                                   | Reaction times analyses |    |         |         | Accuracy analyses |    |         |         |
|---|-------------------------|----|---------|---------|-------------------|----|---------|---------|
|   | $\chi^2$                | df | p Value | Signif. | $\chi^2$          | df | p Value | Signif. |
| (Intercept)                               | 41213.29                | 1  | <.001   | ***     | 150.71            | 1  | <.001   | ***     |
| Target Type                               | 8.54                    | 1  | <.01    | **      | 9.79              | 1  | <.01    | **      |
| Relatedness                               | 2.91                    | 1  | .0881   | +       | 15.72             | 1  | <.001   | ***     |
| Relation Type                             | 2.42                    | 1  | .1194   |         | 0.01              | 1  | .9201   |         |
| Target Type × Relatedness                 | 2.20                    | 1  | .1383   |         | 0.003             | 1  | .9559   |         |
| Target Type × Relation Type               | 0.03                    | 1  | .8545   |         | 1.19              | 1  | .2755   |         |
| Relatedness × Relation Type               | 2.53                    | 1  | .1115   |         | 0.04              | 1  | .8495   |         |
| Target Type × Relatedness × Relation Type | 4.56                    | 1  | .0326   | *       | 0.06              | 1  | .7974   |         |
| Cycle 3                                   | $\chi^2$                | df | p Value | Signif. | $\chi^2$          | df | p Value | Signif. |
| (Intercept)                               | 59354.82                | 1  | <.001   | ***     | 360.33            | 1  | <.001   | ***     |
| Target Type                               | 1.22                    | 1  | .2698   |         | 0.09              | 1  | .7674   |         |
| Relatedness                               | 19.06                   | 1  | <.001   | ***     | 2.56              | 1  | .1093   |         |
| Relation Type                             | 10.29                   | 1  | <.01    | **      | 3.38              | 1  | .0661   | +       |
| Target Type × Relatedness                 | 0.24                    | 1  | .6223   |         | 2.74              | 1  | .0979   | +       |
| Target Type × Relation Type               | 1.91                    | 1  | .1659   |         | 0.55              | 1  | .4568   |         |
| Relatedness × Relation Type               | 12.14                   | 1  | <.001   | ***     | 0.35              | 1  | .5544   |         |
| Target Type × Relatedness × Relation Type | 0.32                    | 1  | .5709   |         | 1.25              | 1  | .2634   |         |

| Adults                                    | $\chi^2$ | df | p Value | Signif. | $\chi^2$ | df | p Value | Signif. |
|---|----------|----|---------|---------|----------|----|---------|---------|
| (Intercept)                               | 98392.12 | 1  | <.001   | ***     | 145.45   | 1  | <.001   | ***     |
| Target Type                               | 0.31     | 1  | .5795   |         | 0.32     | 1  | .5721   |         |
| Relatedness                               | 33.09    | 1  | <.001   | ***     | 0.71     | 1  | .4005   |         |
| Relation Type                             | 9.21     | 1  | <.01    | **      | 0.13     | 1  | .7228   |         |
| Target Type × Relatedness                 | 2.74     | 1  | .0978   | +       | 0.05     | 1  | .8557   |         |
| Target Type × Relation Type               | 1.22     | 1  | .2696   |         | 0.15     | 1  | .7023   |         |
| Relatedness × Relation Type               | 14.47    | 1  | <.001   | ***     | 1.51     | 1  | .2186   |         |
| Target Type × Relatedness × Relation Type | 1.03     | 1  | .3096   |         | 0.65     | 1  | .4194   |         |

## Annexe 4A – Stimuli (mots) utilisés dans l'étude 4

Stimuli utilisés dans l'étude 4 en fonction de chaque condition expérimentale.

| Left Related    | Both Related   | Right Related   | Left Unrelated  | Both Unrelated | Right Unrelated |
|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| abri abri ##### | abri abri abri | ##### abri abri | muet abri ##### | muet abri muet | ##### abri muet |
| agir agir ##### | agir agir agir | ##### agir agir | cent agir ##### | cent agir cent | ##### agir cent |
| aide aide ##### | aide aide aide | ##### aide aide | mort aide ##### | mort aide mort | ##### aide mort |
| aise aise ##### | aise aise aise | ##### aise aise | thon aise ##### | thon aise thon | ##### aise thon |
| ange ange ##### | ange ange ange | ##### ange ange | rhum ange ##### | rhum ange rhum | ##### ange rhum |
| arme arme ##### | arme arme arme | ##### arme arme | foin arme ##### | foin arme foin | ##### arme foin |
| aube aube ##### | aube aube aube | ##### aube aube | porc aube ##### | porc aube porc | ##### aube porc |
| auto auto ##### | auto auto auto | ##### auto auto | ciel auto ##### | ciel auto ciel | ##### auto ciel |
| avec avec ##### | avec avec avec | ##### avec avec | nous avec ##### | nous avec nous | ##### avec nous |
| bain bain ##### | bain bain bain | ##### bain bain | tuer bain ##### | tuer bain tuer | ##### bain tuer |
| beau beau ##### | beau beau beau | ##### beau beau | gros beau ##### | gros beau gros | ##### beau gros |
| bien bien ##### | bien bien bien | ##### bien bien | star bien ##### | star bien star | ##### bien star |
| bond bond ##### | bond bond bond | ##### bond bond | rime bond ##### | rime bond rime | ##### bond rime |
| bord bord ##### | bord bord bord | ##### bord bord | tige bord ##### | tige bord tige | ##### bord tige |
| boue boue ##### | boue boue boue | ##### boue boue | mari boue ##### | mari boue mari | ##### boue mari |
| bout bout ##### | bout bout bout | ##### bout bout | cinq bout ##### | cinq bout cinq | ##### bout cinq |
| bref bref ##### | bref bref bref | ##### bref bref | paix bref ##### | paix bref paix | ##### bref paix |
| cage cage ##### | cage cage cage | ##### cage cage | nord cage ##### | nord cage nord | ##### cage nord |
| camp camp ##### | camp camp camp | ##### camp camp | sien camp ##### | sien camp sien | ##### camp sien |
| cape cape ##### | cape cape cape | ##### cape cape | unir cape ##### | unir cape unir | ##### cape unir |
| case case ##### | case case case | ##### case case | four case ##### | four case four | ##### case four |
| cela cela ##### | cela cela cela | ##### cela cela | soir cela ##### | soir cela soir | ##### cela soir |
| cerf cerf ##### | cerf cerf cerf | ##### cerf cerf | sain cerf ##### | sain cerf sain | ##### cerf sain |
| chef chef ##### | chef chef chef | ##### chef chef | part chef ##### | part chef part | ##### chef part |
| chez chez ##### | chez chez chez | ##### chez chez | bois chez ##### | bois chez bois | ##### chez bois |
| clef clef ##### | clef clef clef | ##### clef clef | rang clef ##### | rang clef rang | ##### clef rang |
| code code ##### | code code code | ##### code code | aigu code ##### | aigu code aigu | ##### code aigu |
| coin coin ##### | coin coin coin | ##### coin coin | peau coin ##### | peau coin peau | ##### coin peau |
| cube cube ##### | cube cube cube | ##### cube cube | ravi cube ##### | ravi cube ravi | ##### cube ravi |
| cuir cuir ##### | cuir cuir cuir | ##### cuir cuir | mets cuir ##### | mets cuir mets | ##### cuir mets |
| dame dame ##### | dame dame dame | ##### dame dame | filz dame ##### | filz dame filz | ##### dame filz |
| dans dans ##### | dans dans dans | ##### dans dans | pour dans ##### | pour dans pour | ##### dans pour |
| date date ##### | date date date | ##### date date | houx date ##### | houx date houx | ##### date houx |
| demi demi ##### | demi demi demi | ##### demi demi | sort demi ##### | sort demi sort | ##### demi sort |
| deux deux ##### | deux deux deux | ##### deux deux | voir deux ##### | voir deux voir | ##### deux voir |
| dieu dieu ##### | dieu dieu dieu | ##### dieu dieu | pont dieu ##### | pont dieu pont | ##### dieu pont |



|                 |                |                |                 |                |                |
|-----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|
| dire dire ##### | dire dire dire | #### dire dire | plus dire ##### | plus dire plus | #### dire plus |
| donc donc ##### | donc donc donc | #### donc donc | pays donc ##### | pays donc pays | #### donc pays |
| drap drap ##### | drap drap drap | #### drap drap | onze drap ##### | onze drap onze | #### drap onze |
| dune dune ##### | dune dune dune | #### dune dune | oral dune ##### | oral dune oral | #### dune oral |
| face face ##### | face face face | #### face face | brun face ##### | brun face brun | #### face brun |
| faim faim ##### | faim faim faim | #### faim faim | cour faim ##### | cour faim cour | #### faim cour |
| fait fait ##### | fait fait fait | #### fait fait | rose fait ##### | rose fait rose | #### fait rose |
| faux faux ##### | faux faux faux | #### faux faux | gris faux ##### | gris faux gris | #### faux gris |
| fier fier ##### | fier fier fier | #### fier fier | clou fier ##### | clou fier clou | #### fier clou |
| film film ##### | film film film | #### film film | cher film ##### | cher film cher | #### film cher |
| fond fond ##### | fond fond fond | #### fond fond | lait fond ##### | lait fond lait | #### fond lait |
| fort fort ##### | fort fort fort | #### fort fort | bleu fort ##### | bleu fort bleu | #### fort bleu |
| fuir fuir ##### | fuir fuir fuir | #### fuir fuir | base fuir ##### | base fuir base | #### fuir base |
| gare gare ##### | gare gare gare | #### gare gare | soin gare ##### | soin gare soin | #### gare soin |
| gras gras ##### | gras gras gras | #### gras gras | menu gras ##### | menu gras menu | #### gras menu |
| grue grue ##### | grue grue grue | #### grue grue | paon grue ##### | paon grue paon | #### grue paon |
| hier hier ##### | hier hier hier | #### hier hier | sauf hier ##### | sauf hier sauf | #### hier sauf |
| hors hors ##### | hors hors hors | #### hors hors | cave hors ##### | cave hors cave | #### hors cave |
| joie joie ##### | joie joie joie | #### joie joie | plan joie ##### | plan joie plan | #### joie plan |
| joue joue ##### | joue joue joue | #### joue joue | avis joue ##### | avis joue avis | #### joue avis |
| jour jour ##### | jour jour jour | #### jour jour | chat jour ##### | chat jour chat | #### jour chat |
| judo judo ##### | judo judo judo | #### judo judo | file judo ##### | file judo file | #### judo file |
| juge juge ##### | juge juge juge | #### juge juge | stop juge ##### | stop juge stop | #### juge stop |
| jupe jupe ##### | jupe jupe jupe | #### jupe jupe | soit jupe ##### | soit jupe soit | #### jupe soit |
| lame lame ##### | lame lame lame | #### lame lame | truc lame ##### | truc lame truc | #### lame truc |
| lave lave ##### | lave lave lave | #### lave lave | crin lave ##### | crin lave crin | #### lave crin |
| leur leur ##### | leur leur leur | #### leur leur | fois leur ##### | fois leur fois | #### leur fois |
| lieu lieu ##### | lieu lieu lieu | #### lieu lieu | gant lieu ##### | gant lieu gant | #### lieu gant |
| main main ##### | main main main | #### main main | seul main ##### | seul main seul | #### main seul |
| mais mais ##### | mais mais mais | #### mais mais | quel mais ##### | quel mais quel | #### mais quel |
| mare mare ##### | mare mare mare | #### mare mare | juin mare ##### | juin mare juin | #### mare juin |
| miel miel ##### | miel miel miel | #### miel miel | roux miel ##### | roux miel roux | #### miel roux |
| mien mien ##### | mien mien mien | #### mien mien | lors mien ##### | lors mien lors | #### mien lors |
| mine mine ##### | mine mine mine | #### mine mine | bloc mine ##### | bloc mine bloc | #### mine bloc |
| mise mise ##### | mise mise mise | #### mise mise | azur mise ##### | azur mise azur | #### mise azur |
| mode mode ##### | mode mode mode | #### mode mode | sang mode ##### | sang mode sang | #### mode sang |
| mois mois ##### | mois mois mois | #### mois mois | lune mois ##### | lune mois lune | #### mois lune |
| mule mule ##### | mule mule mule | #### mule mule | faon mule ##### | faon mule faon | #### mule faon |
| nage nage ##### | nage nage nage | #### nage nage | loir nage ##### | loir nage loir | #### nage loir |
| noir noir ##### | noir noir noir | #### noir noir | vase noir ##### | vase noir vase | #### noir vase |
| note note ##### | note note note | #### note note | prix note ##### | prix note prix | #### note prix |

|                 |                |                 |                 |                |                 |
|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| ogre ogre ##### | ogre ogre ogre | ##### ogre ogre | vain ogre ##### | vain ogre vain | ##### ogre vain |
| oser oser ##### | oser oser oser | ##### oser oser | taxi oser ##### | taxi oser taxi | ##### oser taxi |
| pain pain ##### | pain pain pain | ##### pain pain | trou pain ##### | trou pain trou | ##### pain trou |
| parc parc ##### | parc parc parc | ##### parc parc | kilo parc ##### | kilo parc kilo | ##### parc kilo |
| peur peur ##### | peur peur peur | ##### peur peur | dont peur ##### | dont peur dont | ##### peur dont |
| pied pied ##### | pied pied pied | ##### pied pied | haut pied ##### | haut pied haut | ##### pied haut |
| pile pile ##### | pile pile pile | ##### pile pile | mars pile ##### | mars pile mars | ##### pile mars |
| plat plat ##### | plat plat plat | ##### plat plat | doux plat ##### | doux plat doux | ##### plat doux |
| poil poil ##### | poil poil poil | ##### poil poil | neuf poil ##### | neuf poil neuf | ##### poil neuf |
| pois pois ##### | pois pois pois | ##### pois pois | date pois ##### | date pois date | ##### pois date |
| puce puce ##### | puce puce puce | ##### puce puce | rail puce ##### | rail puce rail | ##### puce rail |
| puis puis ##### | puis puis puis | ##### puis puis | dent puis ##### | dent puis dent | ##### puis dent |
| quoi quoi ##### | quoi quoi quoi | ##### quoi quoi | lent quoi ##### | lent quoi lent | ##### quoi lent |
| rage rage ##### | rage rage rage | ##### rage rage | poli rage ##### | poli rage poli | ##### rage poli |
| rame rame ##### | rame rame rame | ##### rame rame | pion rame ##### | pion rame pion | ##### rame pion |
| rien rien ##### | rien rien rien | ##### rien rien | coup rien ##### | coup rien coup | ##### rien coup |
| rive rive ##### | rive rive rive | ##### rive rive | saut rive ##### | saut rive saut | ##### rive saut |
| robe robe ##### | robe robe robe | ##### robe robe | huit robe ##### | huit robe huit | ##### robe huit |
| rond rond ##### | rond rond rond | ##### rond rond | aile rond ##### | aile rond aile | ##### rond aile |
| roue roue ##### | roue roue roue | ##### roue roue | banc roue ##### | banc roue banc | ##### roue banc |
| rude rude ##### | rude rude rude | ##### rude rude | golf rude ##### | golf rude golf | ##### rude golf |
| ruse ruse ##### | ruse ruse ruse | ##### ruse ruse | laid ruse ##### | laid ruse laid | ##### ruse laid |
| sage sage ##### | sage sage sage | ##### sage sage | noix sage ##### | noix sage noix | ##### sage noix |
| sale sale ##### | sale sale sale | ##### sale sale | chou sale ##### | chou sale chou | ##### sale chou |
| seau seau ##### | seau seau seau | ##### seau seau | brin seau ##### | brin seau brin | ##### seau brin |
| sept sept ##### | sept sept sept | ##### sept sept | bouc sept ##### | bouc sept bouc | ##### sept bouc |
| tard tard ##### | tard tard tard | ##### tard tard | lion tard ##### | lion tard lion | ##### tard lion |
| tien tien ##### | tien tien tien | ##### tien tien | lard tien ##### | lard tien lard | ##### tien lard |
| tour tour ##### | tour tour tour | ##### tour tour | page tour ##### | page tour page | ##### tour page |
| tube tube ##### | tube tube tube | ##### tube tube | pris tube ##### | pris tube pris | ##### tube pris |
| type type ##### | type type type | ##### type type | soif type ##### | soif type soif | ##### type soif |
| veau veau ##### | veau veau veau | ##### veau veau | mont veau ##### | mont veau mont | ##### veau mont |
| vent vent ##### | vent vent vent | ##### vent vent | joli vent ##### | joli vent joli | ##### vent joli |
| venu venu ##### | venu venu venu | ##### venu venu | gars venu ##### | gars venu gars | ##### venu gars |
| vers vers ##### | vers vers vers | ##### vers vers | nuit vers ##### | nuit vers nuit | ##### vers nuit |
| vide vide ##### | vide vide vide | ##### vide vide | port vide ##### | port vide port | ##### vide port |
| vite vite ##### | vite vite vite | ##### vite vite | ours vite ##### | ours vite ours | ##### vite ours |
| voix voix ##### | voix voix voix | ##### voix voix | gens voix ##### | gens voix gens | ##### voix gens |
| vous vous ##### | vous vous vous | ##### vous vous | haie vous ##### | haie vous haie | ##### vous haie |
| yeux yeux ##### | yeux yeux yeux | ##### yeux yeux | long yeux ##### | long yeux long | ##### yeux long |
| zone zone ##### | zone zone zone | ##### zone zone | club zone ##### | club zone club | ##### zone club |

## Annexe 4B – Filtre des participants de l'étude 4

Détail du filtre des participants avec la taille d'échantillon initiale, le nombre de participants non retenus, la taille la taille d'échantillon finale après l'application des deux critères de sélection.

| Cycles                      | Grades  | Initial samples | Criterion 1 | Criterion 2 | Criterion 1-2 | Excluded | Remaining samples |
|-----------------------------|---------|-----------------|-------------|-------------|---------------|----------|-------------------|
| Cycle 2                     | grade 1 | 50              | 16          | 1           | 10            | 27       | 23                |
|                             | grade 2 | 79              | 11          | 7           | 3             | 21       | 58                |
| <i>Subtotal for Cycle 2</i> |         |                 |             |             |               |          | <i>81</i>         |
| Cycle 3                     | grade 4 | 73              | -           | 23          | 4             | 27       | 46                |
|                             | grade 5 | 75              | 1           | 22          | -             | 23       | 52                |
| <i>Subtotal for Cycle 3</i> |         |                 |             |             |               |          | <i>98</i>         |

Note. Le critère 1 a exclu les participants affichants une performance en dessous de 60%. Le critère 2 a exclu les participants avec un niveau de lecture qui ne correspondait pas au niveau attendu pour leur cycle (*i.e.*, les enfants qui affichaient des niveaux de lecture soit très élevés soit très faible). Certains participants présentaient les deux critères à la fois.

## **Déclaration**

Je soussigné Christophe Cauchi déclare que ce travail a été entièrement réalisé par moi-même. Cette thèse a été réalisée sous la direction de Bernard Lété et de Jonathan Grainger dans le respect des principes d'éthique et d'intégrité scientifique, principes inhérents à la mission de recherche.

Le présent travail n'a pas été soumis à un Jury en France ou à l'étranger dans une version identique ou similaire.

Fait à Lyon, le 3 octobre 2022