



**HAL**  
open science

# Coévolution des mécanismes d'encodage de l'information orthographique au cours de l'acquisition de la lecture

Brice Brossette

## ► To cite this version:

Brice Brossette. Coévolution des mécanismes d'encodage de l'information orthographique au cours de l'acquisition de la lecture. Psychologie. Université Lumière - Lyon II, 2023. Français. NNT : 2023LYO20036 . tel-04264426

**HAL Id: tel-04264426**

**<https://theses.hal.science/tel-04264426v1>**

Submitted on 30 Oct 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 : 2023LYO20036

# THÈSE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ LUMIÈRE LYON 2

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

Discipline : Psychologie cognitive

Soutenue publiquement le 7 juillet 2023 par :

**Brice BROSSETTE**

---

## **Coévolution des mécanismes d'encodage de l'information orthographique au cours de l'acquisition de la lecture.**

---

Devant le jury composé de :

Stéphanie MATHEY, Professeure des Universités, Université de Bordeaux, Présidente et Rapporteur

Ludovic FERRAND, Directeur de recherche, CNRS, Rapporteur

Éva COMMISSAIRE, Maîtresse de conférences HDR, Université de Strasbourg, Examinatrice

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

Bernard LÉTÉ, Professeur des Universités, Université Lumière Lyon 2, 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 d'utilisation commerciale - 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, l'adapter ni l'utiliser à des fins commerciales.

# THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

Présentée en vue de l'obtention du grade de

**Docteur de L'Université de Lyon**

Mention : Psychologie Cognitive

Effectuée au sein de

**L'Université Lumière Lyon 2**

Unités de rattachement

**Laboratoire d'Étude des Mécanismes Cognitifs, Université Lumière Lyon 2**

École Doctorale 476 - Neurosciences et Cognition

## **Coévolution des mécanismes d'encodage de l'information orthographique au cours de l'acquisition de la lecture.**

Soutenue publiquement le vendredi 7 juillet 2023, par

**BRICE BROSSETTE**

Devant le jury composé de :

|  |                    |
|--|--------------------|
| Stéphanie MATHEY, Professeur des Universités, Université de Bordeaux         | Rapporteuse        |
| Ludovic FERRAND, Directeur de recherche, CNRS & Université Clermont Auvergne | Rapporteur         |
| Eva COMMISSAIRE, Maitre de Conférences, Université de Strasbourg             | Examinatrice       |
| Stéphanie DUCROT, Chargée de recherche, CNRS & Université Aix-Marseille      | Examinatrice       |
| Bernard LÉTÉ, Professeur des Universités, Université Lyon 2                  | Directeur de thèse |
| Jonathan GRAINGER, Directeur de recherche, CNRS & Université Aix-Marseille   | Directeur de thèse |



# RESUME

L'objectif de cette thèse était d'étudier la coévolution des mécanismes d'encodage de l'information orthographique durant l'apprentissage de la lecture. Le premier chapitre s'est appuyé sur le travail de Grainger et al. (2016) pour réaliser une caractérisation théorique de trois mécanismes orthographiques, à savoir : l'Encodage Position-Spécifique (EPS), l'Encodage Position-Invariant (EPI) et l'Intégration Spatiale (IS). Cette caractérisation visait à soulever deux questions de recherche. La première consistait à déterminer comment la mise en place d'un mécanisme particulier influençait ou était influencée par la mise en place des deux autres mécanismes durant l'apprentissage de la lecture. La seconde question avait pour objectif de décrire leur interdépendance fonctionnelle pour rendre compte de leur efficacité respective. Ces questions ont été examinées empiriquement dans le deuxième chapitre à travers deux études qui ont mesuré la performance de chacun des mécanismes considérés chez des enfants de la 2ème à la 6ème année d'apprentissage de la lecture. Le troisième chapitre propose une réflexion théorique sur la façon dont ces mécanismes sont utilisés pour encoder les unités de la lecture, telles que la lettre, le mot et la phrase. Cette réflexion a conduit à étendre les questions de recherche précédentes aux processus impliqués dans l'encodage de ces unités, en particulier à étudier la relation entre les capacités d'identification du mot écrit et les capacités à traiter plusieurs mots en parallèle pour construire une représentation de la phrase. Ces questions ont été examinées empiriquement dans deux études présentées dans le quatrième chapitre. La première étude, menée auprès d'adultes, avait pour objectif de décrire les relations d'efficacité entre l'encodage des unités lettre, mot et phrase. La seconde étude, menée auprès d'enfants en 2ème, 4ème et 6ème année d'apprentissage, avait pour objectif de spécifier la trajectoire développementale de la capacité à construire une représentation syntaxique de la phrase par le traitement en parallèle des mots, et de déterminer dans quelle mesure cette capacité était liée à la capacité d'identification des mots écrits. Les résultats de ces quatre études ont été soumis à une analyse critique dans la section de discussion. Ces résultats confirment les relations d'interdépendance fonctionnelles liant les mécanismes EPS, EPI et IS et leur influence sur la mise en place de ces mécanismes lors de l'apprentissage de la lecture. En particulier, un degré d'efficacité du mécanisme EPI équivalent à celui attendu en 5<sup>ème</sup> d'apprentissage est nécessaire à l'implémentation du mécanisme IS dans des conditions naturelles de lecture. Enfin, l'analyse critique de ces résultats a permis de mettre en évidence trois points de vigilance pour les futures études portant sur l'exploration de l'hypothèse de coévolution des mécanismes orthographiques. Premièrement, la nature des processus engagés dans les tâches et leur recouvrement doit pouvoir être identifiée avec précision. Deuxièmement, un travail méthodologique rigoureux doit être amorcé pour développer des procédures expérimentales adaptées à la population des apprentis lecteurs. Troisièmement, la première année d'apprentissage de la lecture constitue une fenêtre temporelle essentielle à une compréhension complète de l'hypothèse de la coévolution des mécanismes orthographique, dans laquelle des mesures de l'exposition à l'écrit sont nécessaires. En cela, ce travail de thèse aura permis de fournir les premiers éléments de caractérisation théorique et empirique de cette hypothèse originale et de dresser les contours de son exploration future.

**Mots clés :** Lecture, Apprentissage de la lecture, Traitement orthographique.

## ABSTRACT

This thesis aimed to describe the coevolution of orthographic information encoding mechanisms during learning to read. Building on the work of Grainger et al. (2016), the first chapter performs a theoretical characterization of three orthographic mechanisms, namely: Position-Specific Encoding (PSE), Position-Invariant Encoding (PIE), and Spatial Integration (SI). This characterization was used to specify two research questions. The first was to determine how the implementation of one specific mechanism influenced or was influenced by the implementation of one or more of the other mechanisms during reading instruction. The second question focused on the efficacy relationships, i.e., the functional interdependence, between these mechanisms. These questions were examined empirically in the second chapter through two original studies that measured the impact of each of these mechanisms in children from the 2nd to the 6th year of learning to read. The third chapter proposes a theoretical reflection on how these mechanisms encode reading units, such as letters, words, and sentences. This reflection led to the application of previous research findings to the processes involved in encoding these units, particularly regarding the effect of visual word identification abilities on the ability to process multiple words in parallel to construct a sentence representation. These issues were examined empirically in the fourth chapter through two studies. The first study, conducted with adults, aimed to describe the efficiency relationships between the encoding of letter, word, and sentence units. The second study, conducted with children in 2nd, 4th, and 6th grades, aimed to specify the developmental trajectory of the ability to construct a syntactic representation of the sentence through parallel word processing and to determine the extent to which this ability was related to the ability to identify printed words. The results of these four studies were critically reviewed in the discussion section. These results confirmed that functional interdependence relationships linked the EPS, EPI and IS mechanisms and were likely to constrain the implementation of the EPS, EPI and IS mechanisms during reading acquisition. In particular, a degree of efficiency of the PPE mechanism, close to that expected in the 5th year of learning, is necessary to implement the IS mechanism under natural reading conditions. Finally, the critical analysis of these results highlighted three points of concern for future studies exploring the coevolution hypothesis of orthographic mechanisms. First, the nature of the processes involved in the tasks and their overlap must be precisely identified. Second, rigorous methodological work must be initiated to develop experimental procedures adapted to beginning readers. Third, the first year of learning, and the quantification of exposure to writing during this period, is an essential time window for fully understanding the coevolution hypothesis of orthographic mechanisms. In this respect, this thesis will have provided the first elements of theoretical and empirical characterization of this original hypothesis and will have outlined its future exploration.

**Keywords:** Reading, Reading acquisition, Orthographic processing.

# REMERCIEMENTS

*Pour une première version des remerciements...*

Je remercie toutes les personnes qui m'ont accompagnées durant cette aventure scientifique et en particulier mes deux directeurs de thèse, Bernard et Jonathan. Merci pour votre soutien, vos conseils et votre bienveillance tout au long de ces années. Merci de m'avoir laissé toute la latitude nécessaire pour mener de front mes projets scientifique et sportif. Je mesure la chance d'avoir pu vous avoir à mes côtés pour ce bout d'aventure, et j'espère pouvoir continuer à compter sur vous pour la poursuivre.

Je remercie les enseignants, les directeurs d'écoles et de collèges, les Inspecteurs de l'Éducation nationale, et surtout les 646 enfants et 238 adultes ayant accepté de se prêter au jeu des passations expérimentales. Ce travail n'aurait pas pu voir le jour sans vous.

Je remercie mes camarades de thèse pour nos échanges quotidiens qui auront permis ma réflexion tout au long de ces années.

Je remercie mes amis, les anciens et les nouveaux, rencontrés depuis Annecy, en passant par Valence, Grenoble et Lyon. Vous saurez vous reconnaître et vous savez que, même si la vie fait que nous ne nous voyons pas autant que nous le souhaiterions, vous occupez une place de choix dans mon cœur !

Je remercie ma famille. "Fais quelque chose que tu aimes et ne t'occupe pas des autres !". Que c'est dur à 12 ans de savoir ce que l'on aime et de ne pas se comparer aux autres ! Merci maman, merci papa de m'avoir toujours encouragé à tracer ma propre route vers un monde qui vous est si peu familier. Je vous aime fort !

Enfin, je remercie l'ensemble des membres du jury pour avoir accepté de prendre le temps d'évaluer ce travail.

# TABLE DES MATIERES

|  |           |
|--|-----------|
| RESUME.....  | 2         |
| ABSTRACT .....   | 3         |
| REMERCIEMENTS.....   | 4         |
| TABLE DES MATIERES .....   | 5         |
| PREAMBULE .....  | 12        |
| INTRODUCTION.....  | 14        |
| LA LECTURE ET LES CAPACITES D'IDENTIFICATION DU MOT ECRIT. ....  | 14        |
| LE DEVELOPPEMENT DES CAPACITES D'IDENTIFICATION DU MOT ECRIT.....  | 15        |
| LE TRAITEMENT ORTHOGRAPHIQUE. ....   | 17        |
| TRAITEMENT ORTHOGRAPHIQUE ET CONDITION ECOLOGIQUE DE LECTURE.....  | 19        |
| INFLUENCE DES INFORMATIONS PARAFOVEALES LORS DE L'IDENTIFICATION DU MOT ECRIT. .   | 21        |
| CARACTERISER L'INTERDEPENDANCE FONCTIONNELLE DES MECANISMES DE TRAITEMENT<br>ORTHOGRAPHIQUE. ....                                    | 24        |
| LA PRESENTE THESE.....   | 26        |
| ORGANISATION DU MANUSCRIT .....  | 27        |
| <b>1.    CHAPITRE 1. LES MECANISMES D'ENCODAGE ORTHOGRAPHIQUE<br/>    SELON LE MODELE DE GRAINGER ET AL. (2016).</b> .....           | <b>30</b> |
| 1.1.    LE MECANISME D'ENCODAGE POSITION SPECIFIQUE (EPS).....   | 32        |
| 1.1.1. <i>Paradigme d'étude du mécanisme d'encodage position-spécifique (EPS).</i> .....   | 32        |
| 1.1.2. <i>Signature empirique du mécanisme d'encodage position-spécifique (EPS).</i> .....   | 33        |
| 1.1.3. <i>Caractérisation théorique du mécanisme d'encodage position-spécifique.</i> .....   | 34        |
| 1.1.1.1.    Les mécanismes visuo-attentionnels génériques sous-jacents au mécanisme d'encodage position<br>spécifique.34             |           |
| 1.1.1.2.    L'hypothèse de la modulation des contraintes visuo-attentionnelles par la complexité visuelle des<br>caractères 35       |           |
| 1.1.1.3.    L'hypothèse de l'adaptation des mécanismes visuo-attentionnels.....  | 36        |
| 1.1.4. <i>Développement du mécanisme d'encodage position-spécifique au cours de<br/>        l'apprentissage de la lecture.</i> ..... | 39        |
| 1.1.5. <i>L'encodage de l'information de position par le mécanisme d'encodage position-<br/>        spécifique</i> .....             | 42        |
| 1.1.6. <i>Synthèse</i> .....   | 43        |
| 1.2.    LE MECANISME D'ENCODAGE POSITION INVARIANT (EPI) .....   | 44        |
| 1.2.1. <i>Paradigme d'étude de l'activité du mécanisme d'encodage position-invariant<br/>        (EPI) à grains larges.</i> .....    | 45        |

|            |   |    |
|------------|---|----|
| 1.2.2.     | <i>Signature empirique du mécanisme d'encodage position-invariant.</i>  | 46 |
| 1.2.3.     | <i>Caractérisation du mécanisme d'encodage position invariant.</i>  | 47 |
| 1.2.3.1.   | La problématique d'un schéma d'encodage strict de la position des lettres.  | 47 |
| 1.2.3.2.   | Le mécanisme de bruit de position, un mécanisme visuo-attentionnel pour expliquer la flexibilité de l'encodage de la position des lettres.            | 47 |
| 1.2.3.3.   | L'hypothèse d'un mécanisme position-invariant spécifique pour l'encodage de la position des lettres   | 48 |
| 1.2.4.     | <i>Le développement du mécanisme d'encodage position-invariant au cours de l'apprentissage de la lecture.</i>   | 50 |
| 1.2.4.1.   | L'émergence du mécanisme d'encodage position-invariant au cours de l'apprentissage de la lecture.   | 50 |
| 1.2.4.1.1. | Le mécanisme EPI comme seule source des effets de transpositions de lettres.  | 51 |
| 1.2.4.1.2. | L'additivité du mécanisme de bruit de position et du mécanisme EPI comme sources des effets TL.   | 52 |
| 1.2.4.1.3. | Synthèse sur l'étude de l'émergence du mécanisme EPI au cours de l'apprentissage de la lecture.   | 53 |
| 1.2.5.     | <i>La spécialisation du mécanisme d'encodage position-invariant au cours de l'apprentissage de la lecture.</i>  | 54 |
| 1.2.6.     | <i>Synthèse</i>   | 57 |
| 1.3.       | LE MECANISME D'INTEGRATION SPATIALE   | 58 |
| 1.3.1.     | <i>Paradigme d'étude de l'activité du mécanisme d'intégration spatiale.</i>   | 58 |
| 1.3.2.     | <i>Signature empirique de l'activité du mécanisme d'intégration spatiale.</i>   | 58 |
| 1.3.3.     | <i>Caractérisation théorique du mécanisme d'intégration spatiale.</i>   | 59 |
| 1.3.4.     | <i>Développement du mécanisme d'intégration spatiale au cours de l'apprentissage de la lecture.</i>   | 64 |
| 1.3.4.1.   | Les prérequis au développement du mécanisme d'Intégration Spatiale.   | 64 |
| 1.3.4.2.   | Étude du mécanisme d'intégration spatiale au cours de l'apprentissage de la lecture.  | 67 |
| 1.3.5.     | <i>Synthèse</i>   | 69 |
| 1.4.       | L'HYPOTHESE DE LA COEVOLUTION ORTHOGRAPHIQUE  | 70 |
| 1.4.1.     | <i>Rappel et contextualisation de l'hypothèse de la coévolution des mécanismes orthographiques.</i>   | 70 |
| 1.4.2.     | <i>Choix du design expérimental pour l'étude de l'hypothèse de la coévolution des mécanismes orthographiques</i>                                      | 71 |
| 1.4.2.1.   | Design expérimental utilisé par Fernández-López et al. (2021).  | 71 |
| 1.4.2.2.   | Design expérimental envisagé dans la présente thèse   | 73 |
| 1.4.3.     | <i>Formulation d'hypothèses relatives à la coévolution des mécanismes orthographiques.</i>  | 74 |
| 1.4.3.1.   | Formalisation des hypothèses relatives à l'émergence et à la spécialisation des mécanismes orthographiques au cours de l'apprentissage de la lecture. | 75 |
| 1.4.3.1.1. | Rappel des données empiriques.  | 75 |
| 1.4.3.1.2. | Formulation des hypothèses  | 76 |
| 1.4.4.     | <i>Formalisation des hypothèses relatives à la spécialisation des mécanismes orthographiques au cours de l'apprentissage de la lecture</i>            | 80 |
| 1.4.4.1.   | Rappel des données empiriques.  | 80 |
| 1.4.4.2.   | Formulation des hypothèses  | 80 |

## **2. CHAPITRE 2. ETUDES EXPERIMENTALES DE LA COEVOLUTION DES MECANISMES ORTHOGRAPHIQUES..... 83**

|  |     |
|--|-----|
| 2.1. ÉTUDE 1. EFFET DE L'ALLONGEMENT DE LA DUREE DE PRESENTATION DANS LES PARADIGMES D'INVESTIGATION ORTHOGRAPHIQUE CHEZ L'APPRENTI-LECTEUR..... | 83  |
| 2.1.1. <i>Objectifs</i> .....  | 83  |
| 2.1.2. <i>Méthode</i> .....  | 86  |
| 2.1.2.1. Participants .....  | 86  |
| 2.1.2.2. Tâche d'identification de caractère dans une chaîne (TSI).....  | 87  |
| 2.1.2.2.1. Stimuli .....   | 87  |
| 2.1.2.2.2. Design expérimental.....  | 87  |
| 2.1.2.2.3. Procédure.....  | 87  |
| 2.1.2.3. Tâche de jugement perceptif (SDM).....  | 88  |
| 2.1.2.3.1. Stimuli .....   | 88  |
| 2.1.2.3.2. Design expérimental.....  | 88  |
| 2.1.2.3.3. Procédure.....  | 89  |
| 2.1.2.4. Tâche de décision lexicale (LD).....  | 89  |
| 2.1.2.4.1. Stimuli .....   | 89  |
| 2.1.2.4.2. Design expérimental.....  | 90  |
| 2.1.2.4.3. Procédure.....  | 90  |
| 2.1.3. <i>Résultats</i> .....  | 91  |
| 2.1.3.1. Analyse de détection du signal .....  | 91  |
| 2.1.3.2. Analyse de classification .....   | 94  |
| 2.1.3.2.1. Procédure de classification.....  | 94  |
| 2.1.3.2.2. Description de la solution de classification.....   | 95  |
| 2.1.4. <i>Discussion</i> .....   | 97  |
| 2.1.4.1. Analyse de la modulation des indices de sensibilités par l'allongement des durées de présentation. ....                                 | 98  |
| 2.1.4.2. Recommandations pour le choix des durées de présentation dans les futures études. ....  | 101 |
| 2.1.5. <i>Conclusion</i> .....   | 103 |
| 2.2. ÉTUDE 2. ÉTUDE DES RELATIONS D'INTERDEPENDANCE FONCTIONNELLE DES MECANISMES ORTHOGRAPHIQUE CHEZ L'ENFANT DE 6 <sup>ÈME</sup> ANNEE. ....    | 104 |
| 2.2.1. <i>Objectifs</i> .....  | 104 |
| 2.2.2. <i>Méthode</i> .....  | 107 |
| 2.2.2.1. Participants .....  | 107 |
| 2.2.2.2. Tâche d'identification de caractère dans une chaîne (TSI).....  | 108 |
| 2.2.2.2.1. Stimuli et design expérimental .....  | 108 |
| 2.2.2.2.2. Procédure.....  | 108 |
| 2.2.2.3. Tâche de jugement perceptuel (SDM).....   | 110 |
| 2.2.2.3.1. Stimuli et design expérimental .....  | 110 |
| 2.2.2.3.2. Procédure.....  | 110 |
| 2.2.2.4. Tâche de décision lexicale à lettres flanquées (FLLD) .....   | 111 |
| 2.2.2.4.1. Stimuli et design expérimental .....  | 111 |

|  |            |
|--|------------|
| 2.2.2.4.2. Procédure.....  | 112        |
| <b>2.2.3. Résultats .....</b>  | <b>113</b> |
| 2.2.3.1. Analyse des effets expérimentaux .....  | 113        |
| 2.2.3.1.1. Tâche d'identification de caractères dans une chaîne. (TSI) .....   | 114        |
| 2.2.3.1.2. Tâche de jugement perceptuel (SDM).....   | 115        |
| 2.2.3.1.3. Tâche de décision lexicale à lettres flanquées (FLLD) .....   | 116        |
| 2.2.3.2. Analyses de corrélations pour l'étude des relations inter-tâches .....  | 117        |
| <b>2.2.4. Discussion .....</b>   | <b>119</b> |
| 2.2.4.1. Analyse de la signature empirique obtenue pour chacun des mécanismes considérés.....  | 119        |
| 2.2.4.2. Analyses de relations d'interdépendance entre les tâches TSI, SDM et FLLD pour l'exploration de l'hypothèse de coévolution des mécanismes orthographiques. .... | 122        |
| <b>2.2.5. Conclusion.....</b>  | <b>123</b> |
| <b>3. CHAPITRE 3. L'ENCODAGE ORTHOGRAPHIQUE DES UNITES LETTRE, MOT, PHRASE .....</b>   | <b>125</b> |
| 3.1. L'ENCODAGE DE L'UNITE LETTRE .....  | 126        |
| 3.2. L'ENCODAGE DE L'UNITE MOT .....   | 130        |
| 3.3. L'ENCODAGE DE L'UNITE PHRASE.....   | 133        |
| 3.4. SYNTHESE.....   | 137        |
| <b>4. CHAPITRE 4. ETUDES EXPERIMENTALES DE L'ENCODAGE ORTHOGRAPHIQUE DES UNITES LETTRE, MOT ET PHRASE .....</b>  | <b>138</b> |
| 4.1. ÉTUDE 3. ÉTUDE DES RELATIONS D'INTERDEPENDANCE FONCTIONNELLE DANS L'ENCODAGE ORTHOGRAPHIQUE DES UNITES LETTRE, MOT ET CHEZ L'ADULTE EXPERT. ....                    | 138        |
| 4.1.1. Objectifs .....   | 138        |
| 4.1.2. Abstract .....  | 141        |
| 4.1.3. Introduction.....   | 142        |
| 4.1.4. Results .....   | 147        |
| 4.1.4.1. Response times (RTs).....   | 147        |
| 4.1.4.2. Error rates .....   | 148        |
| 4.1.4.3. Cross-Task Correlations on RTs.....   | 148        |
| 4.1.4.4. Comparison of RT distributions .....  | 149        |
| 4.1.5. Discussion .....  | 151        |
| 4.1.6. Conclusions .....   | 154        |
| 4.1.7. Methods .....   | 154        |
| 4.1.7.1. Participants .....  | 154        |
| 4.1.7.2. General Procedure .....   | 155        |
| 4.1.7.3. Design and Stimuli .....  | 156        |
| 4.1.7.3.1. Alphabetic Decision Task (ADT).....   | 156        |
| 4.1.7.3.2. Lexical Decision Task (LDT).....  | 156        |
| 4.1.7.3.3. Grammatical Decision Task (GDT) .....   | 157        |

|  |            |
|--|------------|
| 4.1.7.3.4. Non-Reading Task (NRT) .....  | 157        |
| <b>4.2. ÉTUDE 4. ÉTUDE DE LA COEVOLUTION DE L'ENCODAGE ORTHOGRAPHIQUE DES<br/>UNITES LETTRE ET PHRASE AU COURS DE L'APPRENTISSAGE DE LA LECTURE.....</b> | <b>159</b> |
| 4.2.1. <i>Objectifs</i> .....  | 159        |
| 4.2.2. <i>Méthode</i> .....  | 161        |
| 4.2.2.1. Participants .....  | 161        |
| 4.2.2.2. Stimuli .....   | 162        |
| 4.2.2.2.1. Tâche de décision lexicale (LDT) .....  | 162        |
| 4.2.2.2.2. Tâche de décision grammaticale (GDT).....   | 162        |
| 4.2.2.2.3. Design expérimental.....  | 163        |
| 4.2.2.2.4. Procédure.....  | 163        |
| 4.2.3. <i>Résultats</i> .....  | 164        |
| 4.2.3.1. Analyse de la performance en fonction de la durée d'affichage .....   | 165        |
| 4.2.3.1.1. Tâche de décision lexicale (LDT) .....  | 165        |
| 4.2.3.1.2. Tâche de décision grammaticale .....  | 167        |
| 4.2.3.2. Analyse de classification .....   | 167        |
| 4.2.3.2.1. Procédure de classification .....   | 167        |
| 4.2.3.2.2. Description de la solution de classification.....   | 169        |
| 4.2.3.3. Analyse de la relation de performance entre les tâches LDT et GDT.....  | 170        |
| 4.2.4. <i>Discussion</i> .....   | 171        |
| 4.2.5. <i>Conclusion</i> .....   | 174        |
| <b>5. CHAPITRE 5. AUTRES CONTRIBUTIONS.....</b>  | <b>175</b> |
| 5.1. ÉTUDE 5. ÉTUDE DE L'INVARIANCE MIROIR LORS DE L'ENCODAGE DE L'IDENTITE<br>ABSTRAITE DES LETTRES. ....   | 175        |
| 5.1.1. <i>Objectifs</i> .....  | 175        |
| 5.1.2. <i>Abstract</i> .....   | 178        |
| 5.1.3. <i>Introduction</i> .....   | 179        |
| 5.1.4. <i>Experiment 1: Classical masked priming paradigm</i> .....  | 183        |
| 5.1.4.1. Method.....   | 183        |
| 5.1.4.1.1. Participants .....  | 183        |
| 5.1.4.1.2. Design and Stimuli .....  | 184        |
| 5.1.4.1.3. Procedure.....  | 184        |
| 5.1.4.2. Results .....   | 186        |
| 5.1.4.2.1. RTs .....   | 187        |
| 5.1.4.2.2. Accuracy.....   | 188        |
| 5.1.4.3. Discussion.....   | 188        |
| 5.1.5. <i>Experiment 2: Sandwich priming</i> .....   | 189        |
| 5.1.5.1. Method.....   | 190        |
| 5.1.5.1.1. Participants .....  | 190        |
| 5.1.5.1.2. Design and Stimuli .....  | 190        |



|  |            |
|--|------------|
| 5.1.5.1.3. Procedure.....  | 190        |
| 5.1.5.2. Results .....   | 191        |
| 5.1.5.2.1. RTs .....   | 191        |
| 5.1.5.2.2. Accuracy.....   | 192        |
| 5.1.5.3. Discussion.....   | 192        |
| <b>5.1.6. Experiment 3 .....</b>   | <b>194</b> |
| 5.1.6.1. Method.....   | 194        |
| 5.1.6.1.1. Participants .....  | 194        |
| 5.1.6.2. Design and Stimuli .....  | 194        |
| 5.1.6.2.1. Procedure.....  | 195        |
| 5.1.6.3. Results .....   | 196        |
| 5.1.6.3.1. RTs .....   | 196        |
| 5.1.6.3.2. Accuracy.....   | 197        |
| 5.1.6.4. Discussion.....   | 197        |
| <b>5.1.7. General Discussion .....</b>   | <b>198</b> |
| 5.1.7.1. How does the priming paradigm constrain the mirror priming effect? .....  | 199        |
| 5.1.7.2. Does visual similarity between mirror-letter primes and targets play a role in the mirror priming effect?<br>201                |            |
| 5.1.7.3. How to explain the graded mirror-letter facilitatory priming effect? .....  | 203        |
| <b>5.1.8. Conclusion.....</b>  | <b>205</b> |
| <b>5.2. ÉTUDE 6. ÉTUDE DE LA COEVOLUTION DES STRATEGIES DE DECODAGE<br/>PHONOLOGIQUE ET D'ENCODAGE ORTHOGRAPHIQUE A GRAINS FINS.....</b> | <b>206</b> |
| 5.2.1. Objectifs .....   | 206        |
| 5.2.2. Abstract .....  | 209        |
| 5.2.3. Introduction.....   | 210        |
| 5.2.4. Methods .....   | 213        |
| 5.2.4.1. Participants .....  | 213        |
| 5.2.4.2. Design and Stimuli .....  | 214        |
| 5.2.4.2.1. Pseudo-homophone nonwords.....  | 215        |
| 5.2.4.2.2. Pseudo-morphemic nonwords .....   | 215        |
| 5.2.4.2.3. Filler words.....   | 215        |
| 5.2.4.3. Procedure and apparatus.....  | 216        |
| 5.2.5. Results .....   | 217        |
| 5.2.6. Discussion .....  | 219        |
| 5.2.7. Conclusion.....   | 221        |
| <b>6. DISCUSSION GENERALE .....</b>  | <b>222</b> |
| 6.1. SYNTHÈSE DES RESULTATS OBTENUS.....   | 223        |
| 6.2. REPONSES AUX QUESTIONS D'INTERET .....  | 226        |
| 6.2.1. Quelles sont les relations d'efficience qu'entretiennent les mécanismes EPS, EPI<br>et IS ?                                       | 226        |

|  |            |
|--|------------|
| 6.2.2. <i>Quelle est la trajectoire développementale de la mise en place des relations d'interdépendance ?</i> .....   | 228        |
| 6.3. CONSIDERATIONS POUR L'EXPLORATION FUTURE DE L'HYPOTHESE DE LA COEVOLUTION DES MECANISMES ORTHOGRAPHIQUES.....     | 232        |
| 6.3.1. <i>Considération n°1 : Nature des processus engagés et recouvrement inter-tâches.</i><br>232                    |            |
| 6.3.2. <i>Considération n°2 : Adaptation des paradigmes expérimentaux à une population d'apprentis lecteurs.</i> ..... | 235        |
| 6.3.3. <i>Considération n°3 : Fenêtre temporelle d'étude et rôle de l'exposition à l'écrit.</i><br>237                 |            |
| 6.4. PERSPECTIVES DE RECHERCHE: DREAM - DEVELOPING READING EXPOSURE AND MOTIVATION.....                                | 239        |
| 6.4.1. <i>Proposal's context, positioning, and objectives.</i> .....   | 239        |
| 6.4.2. <i>Methodology.</i> .....   | 242        |
| 6.4.3. <i>Project management.</i> .....  | 246        |
| 6.4.3.1. Gantt Diagramm .....  | 246        |
| 6.4.3.2. Research Team .....   | 246        |
| 6.4.4. <i>Impact and benefits.</i> .....   | 247        |
| <b>CONCLUSION</b> .....  | <b>248</b> |
| <b>REFERENCES</b> .....  | <b>249</b> |
| <b>DECLARATION</b> .....   | <b>297</b> |

## PREAMBULE

La réalisation de la présente thèse a été soutenue financièrement par l'obtention d'une bourse ministérielle en 2019, obtenue par le biais du concours au Contrat Doctoral Spécifique pour Normalien organisé par l'École Normale Supérieure de Lyon. Dans ce cadre, un projet intitulé *Coévolution des mécanismes de codage et d'intégration spatiale de l'information orthographique lors de la lecture* a été soumis à un comité d'experts.

Ce projet visait à examiner d'un point de vue développemental la coévolution des mécanismes de l'architecture orthographique proposée par Grainger et al. (2016). Les mécanismes considérés étaient : (1) le mécanisme d'encodage **position-spécifique** de la position et de l'identité des lettres, (2) le mécanisme d'encodage **position-invariant** de la position et de l'identité des lettres, et (3) le mécanisme d'**intégration spatiale** de l'information orthographique.

Le projet initial faisait le constat que la littérature proposait une riche caractérisation théorique et empirique de chacun de ces mécanismes. En revanche, il avait été relevé que la caractérisation de *l'interdépendance fonctionnelle* de ces mécanismes demeurait lacunaire. Par interdépendance fonctionnelle, j'entends l'idée que l'efficacité d'un mécanisme donné va exercer des contraintes sur l'efficacité d'un ou plusieurs autres mécanismes de l'interface orthographique. Bien que cette idée ait parfois fait l'objet de caractérisation théorique explicite (e.g., Grainger et al., 2012), elle n'avait jamais fait l'objet d'un examen empirique.

Afin de répondre à cette problématique, le projet de thèse ambitionnait la réalisation d'une étude longitudinale dans laquelle l'efficacité des apprentis lecteurs pour les trois mécanismes précités aurait été évaluée à neuf reprises entre la fin de l'année de Grande Section et la fin de l'année de cours préparatoire. Toutefois, cette ambition a été entravée par la pandémie de Covid-19 et les restrictions sanitaires. En effet, l'accès aux écoles, indispensable

à la mise en place des protocoles transversaux et longitudinaux prévus dans le projet initial, a été restreint pendant plus d'une année.

Malgré ces contraintes inédites, la réalisation d'études transversales a pu être assurée grâce au soutien du ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche à travers un prolongement du contrat doctoral pour une durée de six mois (période initiale : 1<sup>er</sup> octobre 2019 – 31 septembre 2022 ; période finale : 1<sup>er</sup> octobre 2019 – 31 mars 2023). Ce prolongement a permis de finaliser la collecte des données expérimentales en juin 2022 et de permettre leur traitement dans les mois qui ont suivi afin de pouvoir les reporter dans le présent manuscrit. Ces résultats et le contexte théorique afférent sont traités dans les chapitres 1 à 4 du manuscrit.

Par ailleurs, les blocages subis lors de la réalisation du projet initial ont conduit au développement de projets connexes visant à explorer des aspects spécifiques de l'architecture proposée par Grainger et al. (2016). Le chapitre 5 rend compte de ces travaux. Toutefois, la contribution de ces travaux pour la question de la coévolution des mécanismes orthographiques étant limitée, leur interprétation restera confinée à ce seul chapitre.

Enfin, dans une démarche de science ouverte, et afin d'alléger le manuscrit, un certain nombre d'éléments relatif au présent projet de thèse a été dématérialisé (e.g., projet de thèse initial, stimuli utilisés dans les études expérimentales, scripts de traitement de données, etc.). Ces différents éléments sont librement accessibles aux membres du jury à l'adresse suivante : [https://osf.io/mqazk/?view\\_only=2b7949ae061946909b541c9c64cbd00a](https://osf.io/mqazk/?view_only=2b7949ae061946909b541c9c64cbd00a).

# INTRODUCTION

## La lecture et les capacités d'identification du mot écrit.

Au regard de l'évolution, la lecture est une activité récente qui est la conséquence de l'invention de l'écriture il y a un peu plus de 6000 ans (Universalis, 2023). Cette activité, qui était décrite comme "intensément artificielle" par Huey (1908), est devenue une compétence indispensable dans nos sociétés occidentales pour réaliser les actions quotidiennes les plus élémentaires. Ainsi, savoir lire est aujourd'hui crucial pour respecter un traitement médical écrit, remplir un formulaire administratif ou bien postuler un emploi. Dans toutes ces activités, l'objectif est d'établir des connexions entre des symboles écrits (i.e., les lettres) et des unités de sens afin d'assurer la compréhension du texte lu. Ces connexions désignent les processus d'identification du mot écrit qui constituent l'un des deux piliers du modèle de la lecture proposé par Gough et Tunmer (1986). La maîtrise des processus d'identification du mot écrit est dès lors un préalable pour l'accès à une lecture experte qui se caractérise par une lecture fluente et un bon niveau de compréhension du texte écrit. Ces deux aspects de l'expertise en lecture, ainsi que leurs différentes composantes, ont été spécifiés par le modèle de la corde de Scarborough (2001) (cf. Figure 1). Dans cette perspective théorique, l'un des principaux enjeux de l'apprentissage de la lecture est de développer de solides capacités d'identification du mot écrit.

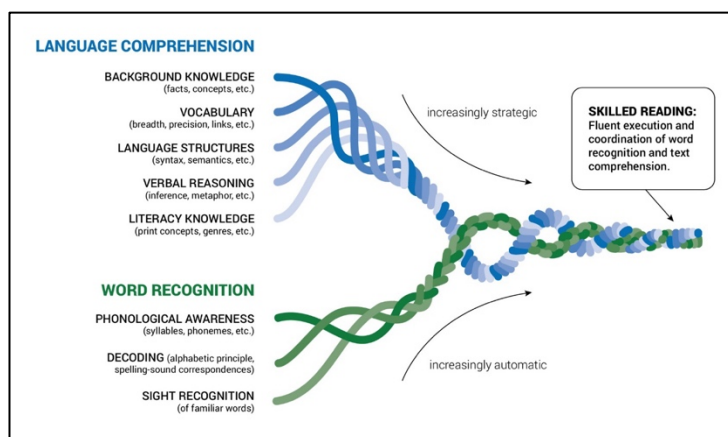


Figure 1. Illustration du modèle de la corde de Scarborough issu de Scarborough, H. S. (2001). *Connecting early language and literacy to later reading (dis)abilities: Evidence, theory, and practice*. In S. Neuman & D. Dickinson (Eds.), *Handbook for research in early literacy* (pp. 97–110). Guilford Press.

## Le développement des capacités d'identification du mot écrit.

Dans l'objectif de tisser la corde la plus solide possible, les enseignants français de première année sont invités, dès les premiers mois d'apprentissage, à concentrer leurs efforts sur le développement de la fluence en lecture associée à l'automatisation des capacités d'identification du mot écrit<sup>1</sup>. La direction dans laquelle ces efforts doivent être dirigés fait aujourd'hui l'objet d'un large consensus au sein de la communauté scientifique. La plupart des modèles de l'apprentissage de la lecture considèrent que l'étape cruciale réside dans la maîtrise des Correspondances Graphèmes-Phonèmes (CGP) (Ehri, 1995; Frith, 1985; Grainger & Ziegler, 2011; Seymour, 1997; Share, 1995; Ziegler & Goswami, 2005). Ces CGP désignent les associations entre une forme graphique et une forme sonore (e.g., la lettre A et le son /a/). L'application de ces associations sur le mot écrit permet d'en retrouver la forme sonore qui est connue de l'enfant par le langage oral ; l'accès à cette forme sonore permettant à son tour l'accès au sens (voir Figure 2.A). Ce principe d'application systématique des CGP réfère à la procédure de décodage phonologique. L'enseignement explicite et systématique de la procédure de décodage phonologique est érigé comme une priorité éducative dans de nombreux pays, y compris dans ceux où les CGP de la langue sont inconsistantes<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Voir le [guide](#) "Pour enseigner la lecture et l'écriture au CP" rédigé par les équipes de la direction générale de l'enseignement scolaire du ministère de l'Éducation nationale et de la Jeunesse.

<sup>2</sup> Les associations CGP sont dites consistantes lorsqu'elles sont uniques, c'est-à-dire qu'une forme sonore donnée ne peut être associée qu'à une seule forme graphique et *vice versa*. En revanche, dès lors que plusieurs formes sonores peuvent être associées à une même forme graphique et inversement, alors la consistance de ces associations est réduite. Les langues qui comprennent une forte proportion de relations consistantes sont dites transparentes, tandis que celles qui comprennent une forte proportion de relations inconsistantes sont dites opaques. L'opacité de langue est parfois un argument avancé par certains auteurs pour remettre en cause la primauté de l'apprentissage des CGP. En effet, lorsque la langue est opaque, les CGP sont peu prédictibles, ce qui peut rendre la procédure de décodage phonologique inopérante. Dans ce cadre, certains auteurs postulent qu'une instruction précoce orientée sur le sens au niveau du mot serait préférable à une instruction précoce orientée sur l'apprentissage des CGP. Ces deux types d'instruction ont longtemps été opposés dans un débat que les Anglo-saxons dénommaient les Guerres de la lecture. Toutefois, les données empiriques collectées au cours des dernières décennies ont largement soutenu la supériorité de l'instruction basée sur l'apprentissage des correspondances CGP indépendamment de l'opacité de la langue (pour un résumé du débat, voir : Castles et al. 2018).

En plus de constituer la première stratégie d'identification du mot écrit, le décodage phonologique constitue également un puissant mécanisme d'auto-apprentissage. Selon Share (1995), chaque décodage réussi permet d'instancier et de renforcer une trace mémorielle de la forme visuelle du mot (voir Figure 2.B). Cette trace mémorielle de la forme visuelle du mot est plus communément désignée sous le terme de représentation orthographique. Cette représentation orthographique contient les informations relatives à l'identité et la position des lettres. L'instanciation d'un nombre croissant de représentations orthographiques au cours de l'apprentissage de la lecture va permettre de développer une seconde stratégie d'accès au sens. Cette stratégie permet un accès direct au sens par la représentation orthographique sans recours aux codes phonologiques (voir Figure 2.C). Elle apparaît grâce à l'automatisation des capacités d'identification du mot écrit et de l'amélioration de la fluence en lecture chez l'enfant.

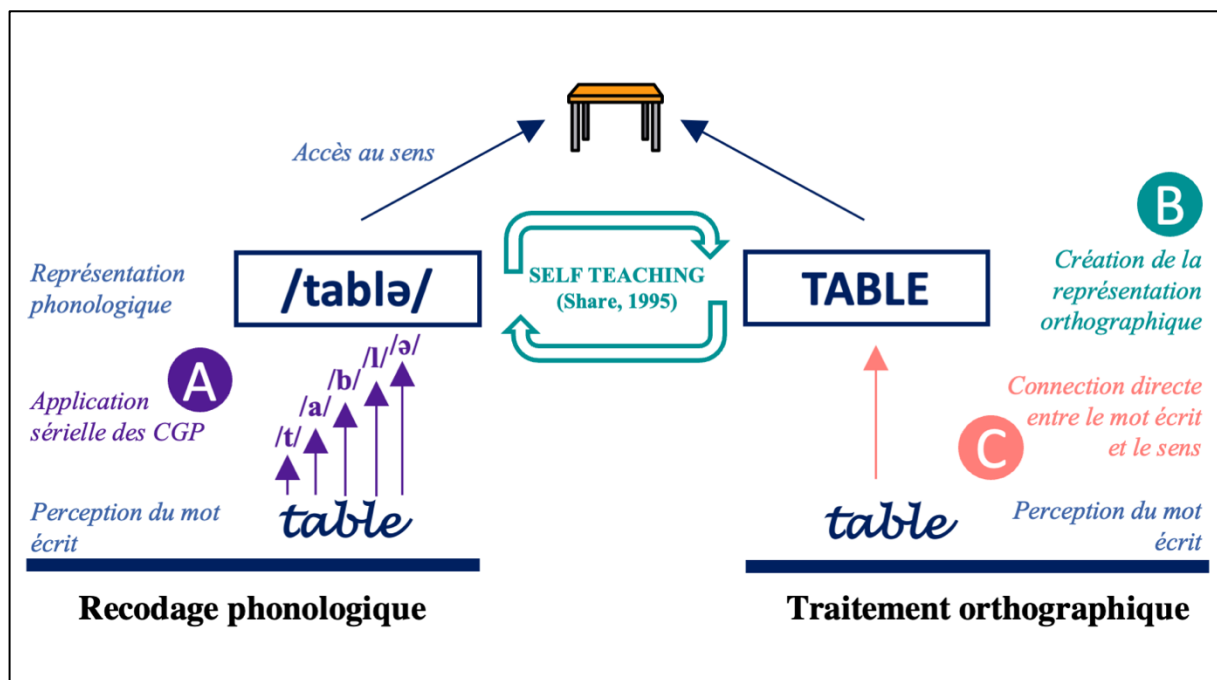


Figure 2. Représentation schématique du développement des capacités d'identification du mot écrit. (A) Dans un premier temps, l'enfant applique de manière sérielle les CGP afin de retrouver la représentation phonologique du mot lu et d'accéder à son sens. (B) En répétant la procédure de décodage phonologique, l'enfant s'engage dans une démarche d'auto-apprentissage qui va lui permettre d'instancier les représentations orthographiques des mots lus. (C) Une fois instanciée, l'enfant peut accéder directement à la représentation orthographique du mot lu, sans avoir recours à la phonologie.

Ces deux stratégies d'identification du mot écrit dessinent l'architecture à double voie de la lecture, initialement formulée par Baron et Strawson (1976) et Forster et Chambers (1973), puis formalisée par Coltheart et al. (2001) dans son modèle à double voie en cascade

(Dual Route Cascaded – DRC – model, en anglais). Dans cette architecture, le lecteur dispose de deux voies d'identification du mot écrit : (1) une voie lexicale, ou voie d'adressage, d'identification directe qui permet la récupération de la représentation orthographique du mot écrit stockée en mémoire ; (2) une voie sous-lexicale, ou voie d'assemblage, d'accès phonologique qui permet l'identification du mot écrit à partir de la récupération de son code phonologique.

### **Le traitement orthographique.**

La lecture experte se caractérise par un recours préférentiel à la voie directe. En effet, par son expérience, le lecteur expert dispose d'un large lexique orthographique permettant d'établir des connexions directes entre le mot écrit et son sens. Les mécanismes permettant d'établir ces connexions ont fait l'objet de nombreuses investigations au cours des dernières décennies. Ces derniers sont généralement désignés de manière indifférenciée sous le terme générique de "traitement orthographique". Le rôle du traitement orthographique est d'encoder les informations relatives à l'identité et la position des lettres dans une représentation orthographique (Grainger, 2018), indépendamment de leurs propriétés physiques. À titre d'exemple, dans la Figure 3, toutes les occurrences du mot TABLE génèrent une configuration d'informations visuelles différentes. Toutefois, le lecteur expérimenté parvient à identifier invariablement la même unité linguistique.

Pour parvenir à cette performance, le lecteur expert doit être capable d'activer la représentation abstraite des lettres. L'activation de la représentation abstraite d'une lettre désigne la capacité à identifier une lettre indépendamment du format visuel particulier dans lequel celle-ci est présentée. Afin d'y parvenir, le lecteur doit tantôt être capable de négliger de larges différences de formes visuelles entre des graphies représentant la même lettre (par exemple "a" et "A"), tantôt être capable d'être sensible à de faibles variations de formes



visuelles (par exemple "e" et "c"). Les recherches empiriques ont révélé que l'activation de l'identité abstraite des lettres était résistante à des variations de taille, de casse, ou de typographie (e.g., Chauncey et al., 2008; Gil-López et al., 2011). Les capacités d'identification seraient même préservées pour des distorsions plus importantes comme dans le cas des captchas (Hannagan et al., 2012).

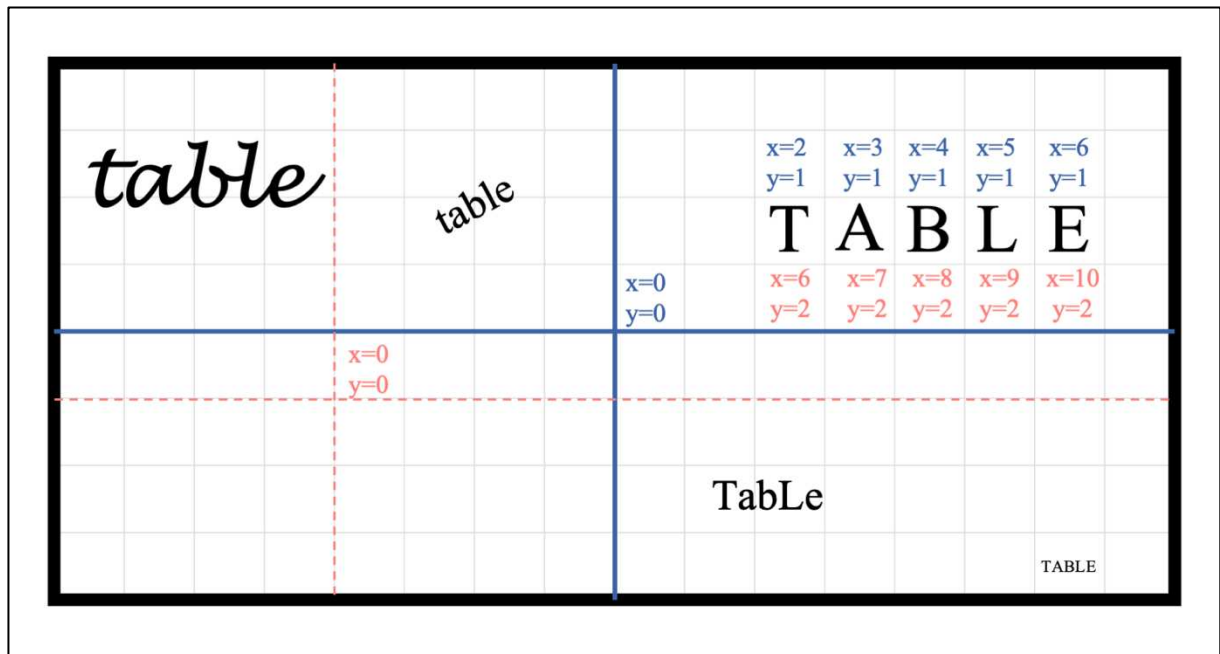


Figure 3. Illustration des différents formats physiques dans lequel le mot "table" peut être présenté et qui doivent être reconnus de manière invariante quel que soit leur position dans l'espace. Les repères bleu et rouge illustrent la modification des coordonnées codées dans le référentiel rétinotopique en fonction de la position du regard pour un même objet visuel (i.e. le mot TABLE) ; la position du regard permettant de définir l'origine du repère ( $x=0$  ;  $y=0$ ).

La seconde condition pour parvenir à cette performance est d'être capable d'identifier la position des lettres indépendamment de leur localisation dans l'espace physique. En effet, dans la Figure 3, si un repère rétinotopique à deux dimensions est considéré et que la position du regard est considérée comme fixe, alors toutes les lettres de l'espace ont une position différente (exprimée par un couple de coordonnées (X ; Y)). Cependant, comme le regard se déplace pendant la lecture, les coordonnées de l'origine du référentiel sont modifiées. De ce fait, les coordonnées de l'ensemble des objets (i.e., les lettres) contenues dans le référentiel sont également modifiées. Ainsi, la coordonnée d'une lettre donnée dans le référentiel rétinotopique sera modifiée autant de fois que la position du regard sera modifiée. Dans ce cadre, l'encodage

de la position des lettres dans un référentiel rétinotopique, appelé encodage position-spécifique, ne permet pas d'encoder une représentation abstraite de la lettre qui serait indépendante de sa position dans l'espace puisque cette position est toujours codée relativement à la position du regard dans l'espace. Afin de résoudre ce problème, le traitement orthographique vise à établir un encodage de la position des lettres indépendant du référentiel rétinotopique, appelé encodage position-invariant. La nature exacte de cet encodage fait encore l'objet d'un vaste débat théorique (voir Davis et Bowers (2006) pour un exemple de comparaison empirique des différents mécanismes d'encodage). Une solution proposée par Grainger et van Heuven (2003) consiste à utiliser un référentiel centré sur le mot. Dans le cadre du modèle à Bigrammes Ouverts (BO) proposé par ces auteurs, le référentiel centré sur le mot est obtenu à l'aide des représentations de bigrammes. Dans ces bigrammes, l'ordre des lettres est respecté mais les lettres peuvent être contiguës ou non contiguës, jusqu'à trois lettres d'écart. Par exemple, le mot "TABLE sera encodé par les bigrammes TA, TB, TL, AB, AL, AE, BL, BE et LE. L'encodage de la position des lettres est dit "position-invariant" car, quel que soit le référentiel rétinotopique où se trouve les lettres, l'information sur leur position au sein du mot reste stable (la lettre B sera toujours à droite de la lettre A dans TABLE).

En somme, accéder à la représentation orthographique d'un mot écrit, c'est (1) abstraire l'identité des lettres et (2) transformer une information sur la position des lettres dépendante d'un référentiel rétinotopique en une information qui ne dépend plus de ce référentiel. Ce traitement permet d'accéder à une représentation unique du mot, quels que soient la forme physique et l'endroit où ce mot est présenté, permettant ainsi un accès stable à son sens.

## **Traitement orthographique et condition écologique de lecture**

Les études sur le traitement orthographique, tel que détaillé ci-dessus, ont principalement été menées dans des paradigmes expérimentaux d'identification de mots isolés.

Cette situation simplifiée d'identification peut apparaître peu écologique au regard de la situation naturelle de lecture (e.g., lecture d'un livre) dans laquelle un mot est toujours entouré d'autres mots. L'information visuelle véhiculée par ces mots est projetée en parallèle sur la rétine. Dès lors, une situation d'identification de mots isolés néglige l'impact des informations véhiculées par les mots adjacents.

Ce choix de simplification méthodologique peut s'expliquer par l'influence de la conception sérielle du traitement des mots de la phrase. Cette conception est défendue par les modèles de traitements oculaires postulant un déplacement séquentiel de l'attention (*Sequential Attention Shift – SAS – model*) dont *E-Z Reader* est l'un des plus influents (Reichle et al., 1998, 1999). Selon ce modèle, les mots de la phrase seraient traités les uns après les autres. Ce n'est qu'une fois l'accès à la représentation orthographique du mot  $n$  effectué, que le traitement du mot  $n+1$  peut débuter. La compréhension des processus d'identification des mots écrits de manière isolée s'avère donc pertinente selon cette approche.

Toutefois, cette conception sérielle a été sérieusement remise en cause à travers l'observation de l'influence des informations parafovéales sur le traitement des informations fovéales (appelés *parafoveal-on-foveal effects*). Ces effets peuvent être mis en évidence à l'aide du paradigme de la frontière (appelé *gaze-contingent boundary paradigm*, Rayner, 1975). Dans ce paradigme, le sujet lit une phrase dans laquelle est désigné un mot cible ( $n$ ). Dès que le regard du participant quitte le mot cible, c'est-à-dire dès que le participant franchit la frontière, le mot adjacent ( $n+1$ ) est manipulé. Par exemple, avant de franchir la frontière, la phrase suivante est présentée au participant : « Jean a cueilli une belle belle pour sa petite amie ». Dans cette phrase, le mot cible est belle et le mot adjacent est belle. Au moment de franchir la frontière, c'est-à-dire lorsque le participant aura fini de fixer le mot cible (belle), le mot adjacent (belle) sera remplacé par le mot adjacent normalement attendu dans le contexte de la phrase (fleur). Du fait de cette manipulation, le participant n'a pas conscience de la manipulation qui vient

d'être effectuée (i.e., que le participant aura la sensation de lire la phrase suivante : « Jean a cueilli une belle fleur pour sa petite amie »). Les résultats obtenus dans ces études révèlent que la répétition du mot cible à la place du mot adjacent (belle belle) produit des temps de fixations plus courts sur le mot cible (belle) que lorsque le mot adjacent correspond au mot attendu dans le contexte de la phrase (belle fleur) (e.g., Angele et al., 2013; Dare & Shillcock, 2013). Cet effet s'expliquerait par le fait que les informations véhiculées par le mot adjacent (n+1) sont utilisées pendant le traitement du mot cible. Une telle interprétation nécessite d'envisager une conception parallèle du traitement des mots de la phrase. Pour Reichle et al. (2009), cette conception est difficilement défendable car une influence des informations parafovéales sur le traitement du mot fovéal devrait conduire à l'activation simultanée des informations orthographiques du mot cible et du mot adjacent. Cette activation générerait une information bruitée ne correspondant à aucun des deux mots.

Toutefois, comme le souligne Snell et Grainger (2019), la compréhension de l'impact des informations parafovéales sur le traitement du mot fovéal est limité par la structure des modèles de mouvements oculaires lors de la lecture qui conçoivent le module d'identification du mot écrit comme une boîte noire. D'autre part, cette compréhension est également limitée par le fait que les modèles d'identification du mot écrit se sont principalement concentrés sur le mot isolé en négligeant le rôle des informations parafovéales.

### **Influence des informations parafovéales lors de l'identification du mot écrit.**

Depuis une dizaine d'années, l'utilisation du paradigme des flanqueurs permet une meilleure prise en compte de l'influence des informations parafovéales lors de l'identification du mot écrit. Ce paradigme expérimental, le FLLD (*Flanking Letters Lexical Decision*) a été développé par (Dare & Shillcock, 2013) pour le traitement du mot écrit à la suite d'Eriksen (1995) qui l'avait utilisé pour l'étude des processus attentionnels dans l'identification des objets.

Dans le FLLD, les participants doivent effectuer un jugement de lexicalité sur un mot cible entouré de bigrammes ou de mots entiers (e.g., PA CHAT IN). La durée de présentation du stimulus (généralement  $\approx 170$  ms) ne permet pas d'effectuer une saccade sur les flanqueurs. L'intérêt du paradigme est de pouvoir manipuler la nature de l'information parafovéale (orthographique, phonologique, sémantique, morphologique, ...) et d'analyser son effet sur le traitement du mot cible. Ainsi, le FLLD permet de se rapprocher d'une situation de lecture naturelle tout en évitant le déplacement du regard et la programmation oculomotrice d'une saccade. Dans le cas où l'information parafovéale apportée par les flanqueurs influence le traitement du mot cible, l'effet ne peut être expliqué que par un traitement en parallèle des informations parafovéales (flanqueurs) et fovéale (mot cible). C'est précisément cette influence qu'ont constatée Dare et Shillcock (2013), puis Grainger et ses collaborateurs dans une série d'étude (e.g., Cauchi et al., 2020; Grainger et al., 2021; Snell, Meeter, et al., 2017). Par exemple, Dare et Shillcock (2013) ont constaté que la reconnaissance du mot cible était facilitée lorsque l'information orthographique contenue dans les flanqueurs était congruente (e.g., CH CHAT AT) comparativement à la condition non congruente (e.g., PA CHAT IN).

Pour rendre compte de ces résultats dans le cadre d'un modèle de l'identification du mot écrit, Grainger et al. (2014) ont proposé d'étendre le modèle de Grainger et van Heuven (2003). Ce modèle implémente les mécanismes génériques du traitement orthographique évoqués dans la section 1.3 : encodage de l'identité abstraite, encodage de la position des lettres position-spécifique et encodage de la position des lettres position-invariant. À ces mécanismes, Grainger et al. (2014) proposent d'ajouter un mécanisme d'intégration spatiale de l'information orthographique. Ce mécanisme<sup>3</sup> vise à étendre l'application des mécanismes génériques du

---

<sup>3</sup> Ainsi défini, le mécanisme d'intégration spatiale est plus une modalité d'application particulière des mécanismes orthographiques génériques qu'un mécanisme à part entière. La proposition de Grainger et al. (2014) réside d'ailleurs principalement dans l'adaptation du schéma de codage position-invariant plutôt que dans la formulation d'un nouveau schéma de codage. Toutefois, afin d'en souligner les spécificités, ce mécanisme d'intégration spatiale de l'information orthographique sera considéré ici comme un mécanisme à part entière.

traitement orthographique aux mots adjacents au mot fixé. En d'autres termes, les informations sur l'identité et la position des lettres seraient extraites à travers plusieurs mots en parallèle. Ainsi, dans la tâche de FLLD, le mécanisme d'intégration spatiale permet de rendre compte de l'influence des informations orthographiques contenues dans les flaqueurs sur le traitement du mot cible. Si cette proposition peut paraître triviale, aucun modèle de l'identification du mot écrit ne l'avait pourtant considérée jusqu'alors. Récemment, Snell et al. (2018) ont proposé d'implémenter ce mécanisme dans un modèle de simulation des mouvements oculaires lors de la lecture. Cette modélisation défend la plausibilité du traitement en parallèle de mots lors de la lecture en montrant comment l'extraction en parallèle des caractéristiques orthographiques de plusieurs mots permet l'élaboration d'une représentation syntaxique de la phrase lors de la lecture. La perspective, ouverte par cette modélisation, permet d'étendre la définition du traitement orthographique proposée dans les sections précédentes. Le traitement orthographique peut ainsi être défini comme l'ensemble des processus permettant l'extraction en parallèle des informations sur l'identité et la position des lettres à travers les mots.

Selon cette définition, et en accord avec les éléments développés précédemment, le traitement orthographique peut-être caractérisé selon trois dimensions :

- a) La capacité d'encoder l'identité abstraite des lettres et leur position dans un format position-spécifique ; ci-après, **mécanisme d'Encodage Position-Spécifique (EPS)**.
- b) La capacité de transformer l'encodage de la position des lettres d'un format position-spécifique à un format position-invariant ; ci-après, **mécanisme d'Encodage Position-Invariant (EPI)**.
- c) La capacité d'appliquer ces mécanismes en parallèle à plusieurs mots ; ci-après, **mécanisme d'Intégration Spatiale (IS)**.

## **Caractériser l'interdépendance fonctionnelle des mécanismes de traitement orthographique.**

Grainger et al. (2016) ont proposé une nouvelle architecture théorique permettant l'intégration des données de recherche sur le traitement orthographique lors de la lecture provenant de champs disciplinaires différents afin d'en permettre la compréhension dans un cadre unifié. S'appuyant notamment sur l'extension du modèle de Grainger et van Heuven (2003) par Grainger et al. (2014), cette nouvelle architecture place les trois mécanismes orthographiques décrits précédemment au centre du processus d'identification du mot écrit. Le concept d'interdépendance fonctionnelle traduit l'idée que l'activité d'un mécanisme orthographique particulier dépend de l'activité des autres mécanismes orthographiques qui lui sont liés.

Pour illustrer ce principe, il est possible d'imaginer que le mécanisme IS limite la quantité d'information qui peut être traitée par le mécanisme EPS. En effet, plus le lecteur est capable d'intégrer l'information orthographique au-delà du mot fixé, plus la quantité d'information que doit traiter le mécanisme EPS est importante. En retour, l'efficacité du mécanisme EPS limite la quantité et la qualité de l'information qui peut être traitée par le mécanisme EPI. La Figure 4 illustre comment une variation de l'efficacité du mécanisme IS modifie l'activité des mécanismes EPS et EPI dans le cadre de l'hypothèse d'interdépendance fonctionnelle.

Cependant, bien que l'architecture théorique proposée par Grainger et al. (2016) revendique une perspective intégrée, la caractérisation de l'interdépendance fonctionnelle de ces mécanismes reste encore incomplète. Par exemple, les hypothèses formulées dans le paragraphe précédent n'ont à aucun moment été formulées explicitement par les auteurs. À notre avis, cela peut s'expliquer par le fait que ces mécanismes ont été investigués de manière relativement indépendante en recourant à des paradigmes expérimentaux différents. Ces investigations ont permis de développer une interprétation de chaque mécanisme pris isolément,

aussi bien chez le lecteur expert que chez le lecteur débutant. Toutefois, l'étude d'un mécanisme isolé ne permet pas de saisir la dynamique des liens d'interdépendance fonctionnelle qu'il entretient avec les autres mécanismes.


|  |   |                               |
|--|---|-------------------------------|
| <i>Informations encodées par le mécanisme EPI</i>                                  | <b>RO, R#, O#, RO, RC, RK, OC, OK, O#, CK, C#, K#, CK</b> | <b>RO, RC, RK, OC, OK, CK</b> |
| <i>Informations encodées par le mécanisme EPS</i>                                  | <b>R, O, R, O, C, K, R, C, K</b>                          | <b>R, O, C, K</b>             |
| <i>Mots écrits</i>   | <b>RO ROCK CK</b>   | <b>RO ROCK CK</b>             |
|  | <i>Étendue du mécanisme d'Intégration Spatiale (IS)</i>   |                               |

Figure 4. Illustration d'une situation particulière d'interdépendance fonctionnelle entre les mécanismes d'Encodage Position Spécifique (EPS), d'Encodage Position Invariant (EPI) et d'Intégration Spatiale (IS). Dans cette situation, la quantité d'information traitée par le mécanisme IS limite la quantité d'information qui peut potentiellement être traitée par les mécanismes EPS et EPI.

Un moyen de saisir cette dynamique serait d'investiguer le fonctionnement de l'ensemble de ces mécanismes chez un même participant. L'idée serait d'obtenir une mesure d'efficacité de chaque mécanisme pour chaque participant. Les relations entre ces mesures d'efficacité pourraient ensuite être analysées pour spécifier les hypothèses d'interdépendance fonctionnelle. Bien que cette approche apparaisse évidente, aucune étude n'a encore été menée dans cette perspective<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> À l'exception d'une étude de Fernández-López et al. (2021) publiée au cours de la réalisation du projet de thèse, qui s'est intéressée spécifiquement au développement des mécanismes EPS et EPI lors de l'apprentissage d'un nouveau script chez l'adulte normo-lecteur. Les résultats de cette étude seront développés dans la section 2.4 du chapitre 2.



## La présente thèse

La présente thèse a pour objectif de caractériser l'interdépendance fonctionnelle des mécanismes EPS, EPI et IS au cours de l'apprentissage de la lecture et de comprendre comment ceux-ci se mettent correctement en place.

Comme défini précédemment, l'interdépendance fonctionnelle renvoie aux relations d'efficience entre les différents mécanismes orthographiques. Pour qu'il puisse y avoir une relation d'efficience entre deux mécanismes, il est nécessaire que ces deux mécanismes soient opérationnels. Or, au début de l'apprentissage de la lecture, ces mécanismes ne le sont pas. La façon dont ces mécanismes deviennent opérationnels peut faire l'objet de deux hypothèses alternatives : 1) soit ces mécanismes deviennent opérationnel simultanément et gagnent progressivement en efficience au cours de l'apprentissage de la lecture ; 2) soit ces mécanismes deviennent opérationnels par phases. Selon cette dernière hypothèse, l'opérationnalisation d'un mécanisme donné pourrait être contrainte par le fait que le mécanisme qui lui est lié soit suffisamment efficient. Cette idée a déjà été esquissée par Grainger et al. (2012) qui postulent que la mise en place du mécanisme EPS précède et contribue à la mise en place du mécanisme EPI. Toutefois, cette hypothèse n'a pas encore été soumise à un examen empirique. De plus, aucune caractérisation complète du décours temporel de la mise en place conjointe des mécanismes EPS, EPI, et IS au cours de l'apprentissage de la lecture n'a encore été proposée.

L'objectif de cette thèse est de **proposer une caractérisation théorique et empirique de la coévolution des mécanismes d'Encodage Position-Spécifique, d'Encodage Position-Invariant et d'Intégration Spatiale au cours de l'apprentissage de la lecture**. Le terme **coévolution** est utilisé pour rendre compte des notions relatives :

- a) aux relations d'efficience qu'entretiennent ces mécanismes orthographiques une fois mis en place (i.e., leur interdépendance fonctionnelle)
- b) à la description de la mise en place des mécanismes orthographiques au cours de l'apprentissage de la lecture.

## Organisation du manuscrit

Afin d'examiner l'hypothèse de coévolution des mécanismes orthographiques, le présent manuscrit est articulé autour de deux niveaux d'opérationnalisation :

- **Le niveau micro-** visant à opérationnaliser de manière spécifique l'hypothèse de coévolution en s'appuyant sur les mécanismes orthographiques décrits ci-dessus. Le **Chapitre 1** propose une caractérisation théorique et opérationnelle de ces mécanismes selon le modèle de Grainger et al. (2016). Les principaux résultats empiriques obtenus chez l'adulte normo-lecteur et chez l'apprenti lecteur y sont présentés. Puis une proposition de caractérisation théorique de l'hypothèse de coévolution est développée. Dans le **Chapitre 2**, deux études expérimentales sont présentées. La première étude vise à analyser la performance d'enfant de 6 à 11 ans dans trois tâches orthographiques. La seconde étude vise à évaluer l'efficacité d'enfant de 6<sup>ème</sup> pour chacun des mécanismes orthographiques précités.
- **Le niveau macro-** visant à opérationnaliser de manière plus générale l'hypothèse de coévolution. Dans ce cadre, plutôt que de considérer spécifiquement les mécanismes orthographiques, nous nous sommes intéressés aux unités orthographiques encodées par ces mécanismes. Les unités orthographiques considérées sont la lettre, la phrase et le mot. L'encodage de ces unités engage de manière différenciée les mécanismes orthographiques considérés ici. En effet, l'encodage d'une phrase nécessite à la fois d'intégrer spatialement l'information orthographique et d'encoder l'identité et la position relative des lettres. L'encodage d'un mot nécessite d'encoder l'identité et la position relative des lettres, alors que l'encodage de la lettre ne nécessite que l'encodage de son identité. Par ailleurs, comme le souligne Grainger (2018), l'encodage de ces objets est interdépendant puisque "les lettres sont les blocs de construction des mots, et que les mots sont les blocs de construction des phrases". Dans ce cadre, le **Chapitre 3** vise à

caractériser théoriquement comment l'efficacité de l'encodage des différents objets orthographiques permet d'apporter un nouvel éclairage à l'hypothèse de coévolution. Le **Chapitre 4** présente deux études expérimentales. La première étude vise à explorer les relations d'efficacité dans l'encodage des lettres, des mots et des phrases, chez l'adulte normo-lecteur. La seconde étude vise à déterminer la trajectoire développementale sous-tendant l'encodage des unités "mots" et "phrases" chez l'apprenti lecteur.

En complément, le **Chapitre 5** présente deux études expérimentales visant à examiner des aspects spécifiques de l'architecture de Grainger et al. (2016). La première étude, menée chez l'adulte lecteur-expert, présente des résultats relatifs à l'étude des propriétés d'abstractions de l'identité des lettres en s'intéressant à la problématique de l'invariance miroir. La seconde étude, menée chez des enfants du CP au CM2, présente des résultats relatifs au recours aux stratégies de décodage phonologique et de décomposition morpho-orthographique pour l'identification du mot écrit au cours de l'apprentissage de la lecture. Bien que les résultats de ces études puissent être interprétés dans le cadre de l'architecture proposée par Grainger et al. (2016), leur interprétation demeurera restreinte à ce chapitre. En effet, leur apport pour discuter l'hypothèse de coévolution est limité comparativement aux études présentées dans les chapitres 2 et 4.

Pour clôturer ce travail de thèse, une **Discussion** des résultats présentés dans les **Chapitres 2 et 4** sera réalisée. Celle-ci permettra d'extraire les éléments pertinents à la caractérisation théorique de l'hypothèse de coévolution et d'esquisser les perspectives de recherche dans ce domaine. La Figure 5 reprend l'organisation du présent manuscrit.

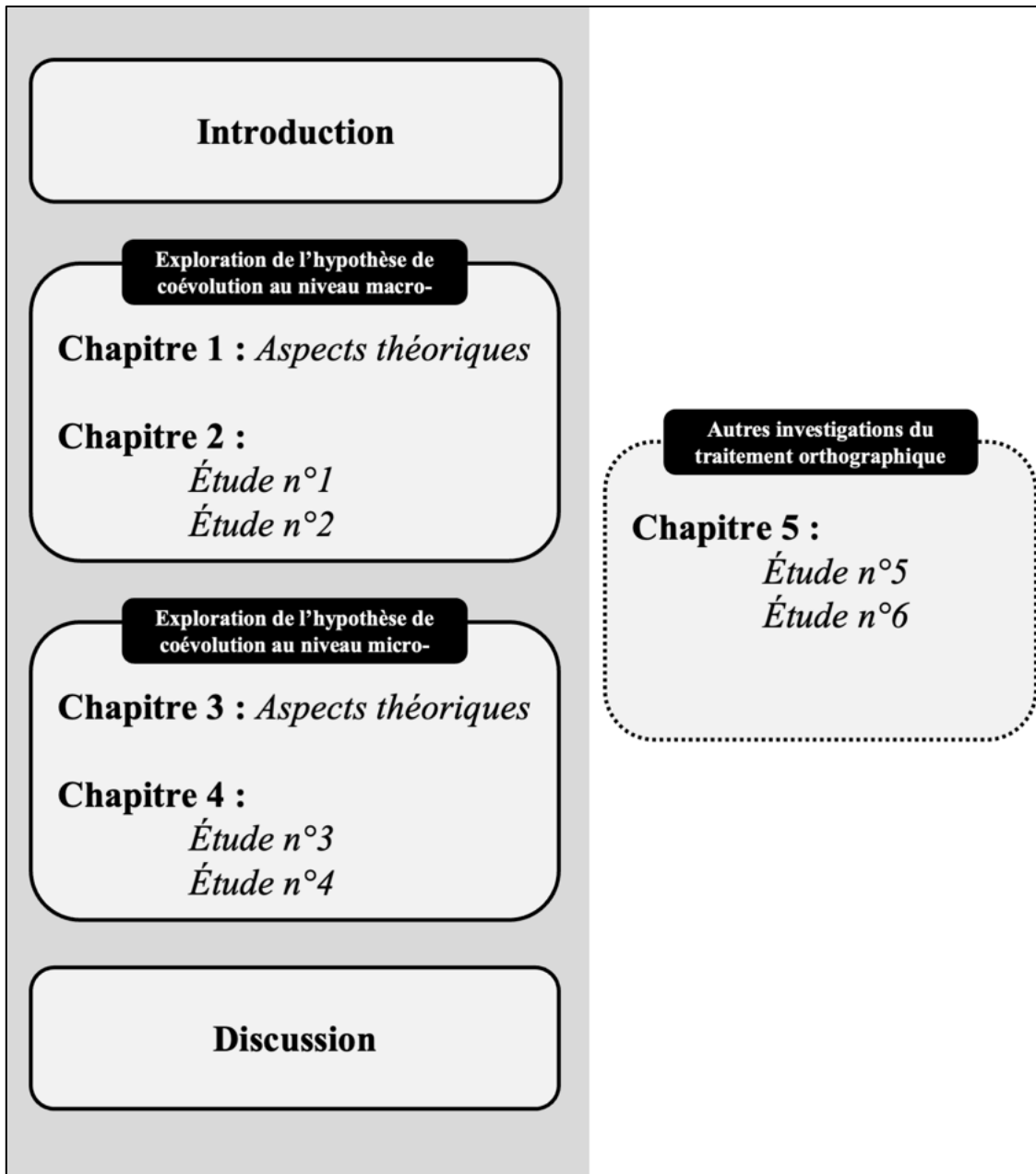


Figure 5. Représentation schématique de l'organisation du manuscrit

# **CHAPITRE 1. LES MECANISMES D'ENCODAGE ORTHOGRAPHIQUE SELON LE MODELE DE GRAINGER ET AL. (2016).**

L'objectif de ce premier chapitre est de formuler une nouvelle proposition théorique qui permettra de considérer les hypothèses relatives à la coévolution des mécanismes d'encodage orthographique dans le cadre du modèle de Grainger et al. (2016). La formulation de cette nouvelle proposition s'attachera à respecter le principe de modélisation incrémentale imbriquée (Jacobs & Grainger, 1994). Selon ce principe, la formulation d'une nouvelle proposition théorique doit répondre à deux impératifs :

- (1) « Le nouveau modèle doit être apparenté ou inclure au moins un de ses propres prédécesseurs directs. »
- (2) « Le nouveau modèle doit également être testé sur les ensembles de données qui ont motivé la construction des anciens modèles avant d'être testés sur de nouveaux ensembles de données ».

Le respect de ces deux impératifs permet de s'assurer que la nouvelle proposition constitue un progrès scientifique. Ainsi, afin de satisfaire ces impératifs : (1) la nouvelle proposition théorique inclura le modèle du traitement orthographique de Grainger et al. (2016) et (2) l'explication des effets de la coévolution orthographique seront évalués en utilisant les paradigmes expérimentaux ayant conduit à l'élaboration de ladite architecture. La description de la nouvelle proposition théorique sera articulée autour des trois mécanismes orthographiques considérés, à savoir :

- (1) Le mécanisme d'Encodage Position-Spécifique (EPS)
- (2) Le mécanisme d'Encodage Position-Invariant (EPI)
- (3) Le mécanisme d'Intégration Spatiale de l'information orthographique (IS)

Après avoir décrit ces mécanismes, une hypothèse de la coévolution des mécanismes orthographiques sera proposée. Le lecteur notera que ces mécanismes ne concernent que les aspects de l'architecture liés à la voie de traitement à grains larges (voir encadré rouge de la Figure 6). Le lecteur pourra se référer à l'Étude 6 s'il souhaite avoir un aperçu des aspects liés à la voie de traitement à grains fins qui n'entrent pas dans la spécification de l'hypothèse de la coévolution des mécanismes orthographiques.

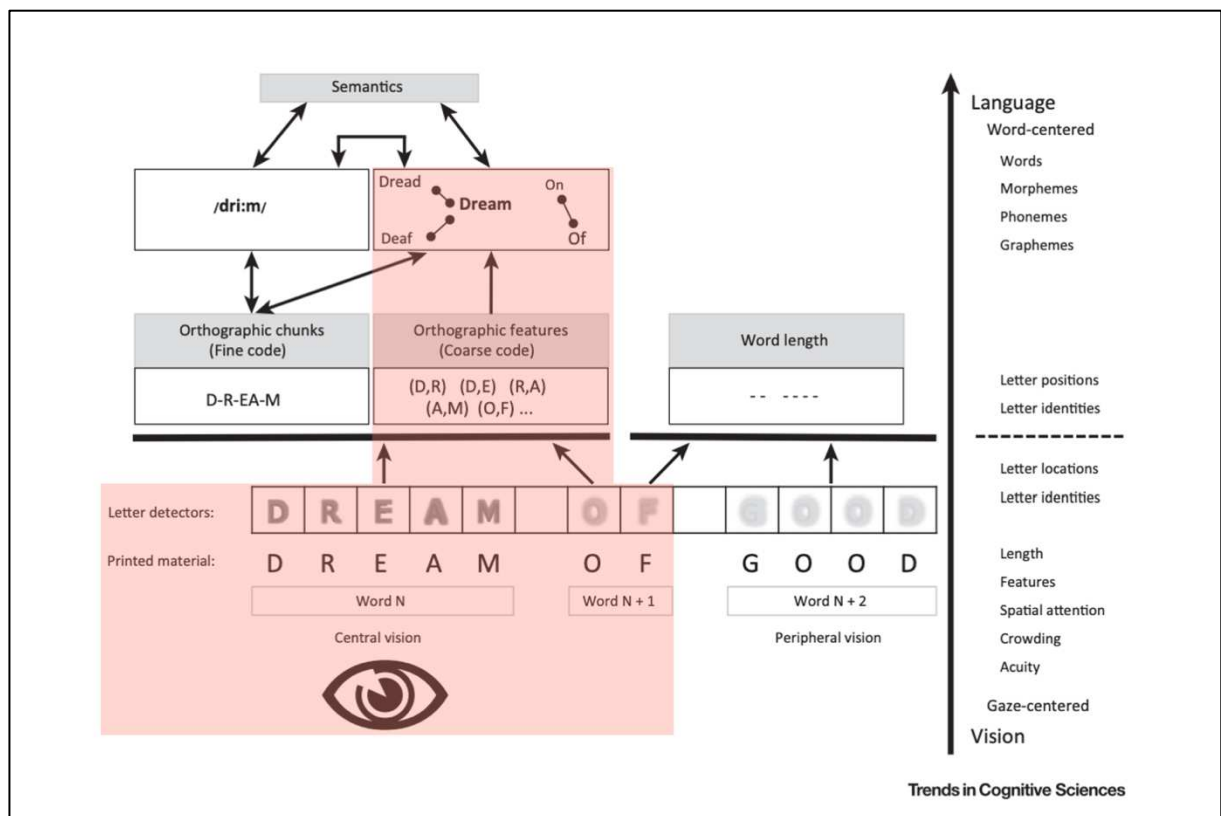


Figure 6. Architecture du traitement orthographique pendant la lecture proposée par Grainger et al. (2016). La fixation du regard sur le mot N permet d'extraire les informations orthographiques de ce mot et du mot adjacent N+1 (mécanisme d'intégration spatiale) à l'aide des détecteurs de lettres centrés sur le regard (mécanisme d'Encodage Position-Spécifique). Cette information est ensuite transformée en deux codes orthographiques, appelés code à grains fins et code à grains larges (mécanisme d'Encodage Position-Invariant), qui permettent respectivement un accès rapide à la forme phonologique et à la représentation sémantique du mot. L'encadré rouge correspond aux aspects de l'interface orthographique qui seront investigués dans cette thèse.

## **1.1. Le mécanisme d'encodage position spécifique (EPS)**

Selon Grainger (2018), le premier aspect du développement de l'expertise orthographique concerne la mise en place d'un système spécialisé pour le traitement en parallèle de l'identité et de la position des lettres au sein du mot. Ce système est ici désigné sous le terme de **mécanisme d'encodage position-spécifique (EPS)**. Dans le cadre de l'architecture de Grainger et al. (2016), sur la base de la proposition du modèle de Grainger et van Heuven (2003), ce mécanisme est implémenté par un ensemble de Détecteurs de Lettres Centrés sur le Regard (DLCR).

### ***1.1.1. Paradigme d'étude du mécanisme d'encodage position-spécifique (EPS).***

L'activité du mécanisme EPS est traditionnellement étudiée à travers une tâche d'identification de cible dans une chaîne de caractères (*Target-in-String Identification task* en anglais, nommé tâche TSI ci-après). Cette tâche est inspirée de celles utilisées antérieurement par Reicher (1969) et Wheeler (1970). La version utilisée pour l'étude du mécanisme EPS consiste à présenter brièvement (environ 100 ms) une chaîne de 5 caractères pendant que le participant fixe le centre de l'écran. La chaîne de caractères est ensuite remplacée par un masque et l'une des cinq positions est signalée. Le participant doit alors reporter le caractère signalé. Plusieurs modalités de report sont possibles (e.g., Tydgat & Grainger, 2009). La plus couramment utilisée est le report forcé à deux choix alternatifs (2-Alternative-Forced-Choice, 2AFC). Dans cette modalité, le participant doit choisir entre deux caractères : l'un correspondant au caractère se trouvant à la position signalée, l'autre correspondant à un caractère distracteur. La Figure 7 illustre la procédure expérimentale du paradigme TSI.

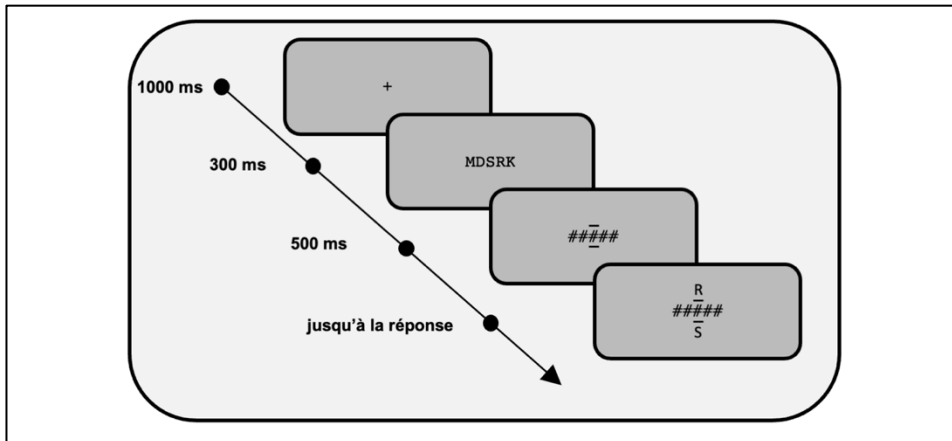


Figure 7. Illustration de la procédure expérimentale de la tâche TSI utilisée par Grainger, Lété, et al., (2016)

### 1.1.2. Signature empirique du mécanisme d'encodage position-spécifique (EPS).

Le résultat empirique clé obtenu dans le paradigme TSI est que les chaînes de lettres (e.g., QRCTV) et de chiffres (e.g., 87351) sont traitées différemment des chaînes de symboles (e.g., & %? < £). Le traitement des chaînes de lettres et de chiffres révèle une **fonction sérielle de position en W** (i.e., de meilleurs taux de report pour les caractères externes – Q, V, 8, 1 – et le caractère central – C, 3), alors que celui des chaînes de symboles révèle une fonction sérielle de position en  $\Lambda$  (i.e., uniquement un avantage pour le report du caractère central – ?; voir Tydgat et Grainger, 2009). La Figure 8.A illustre la fonction sérielle en W obtenue pour les lettres et les chiffres ; la Figure 8.B illustre la fonction sérielle en  $\Lambda$  obtenue pour les symboles.

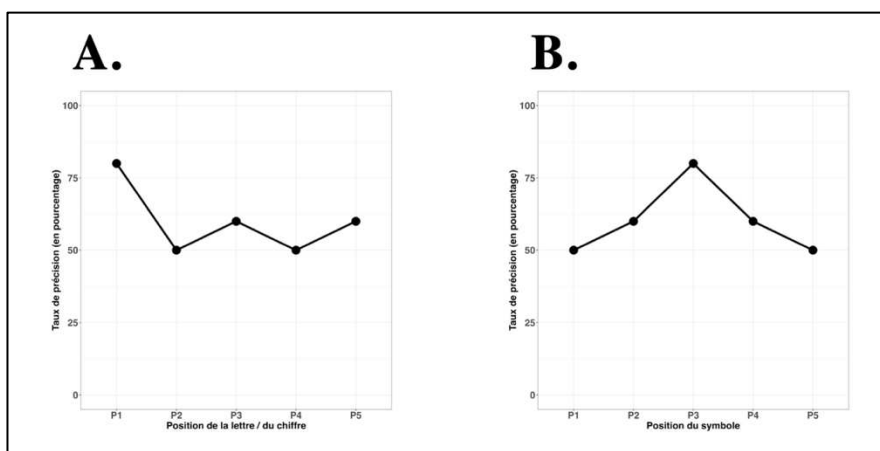


Figure 8. (A) Fonction sérielle de position typique pour les lecteurs adultes dans une tâche de report partiel avec des chaînes de lettres ou de chiffres. (B) Fonction sérielle de position typique pour les lecteurs adultes dans une tâche de report partiel avec des chaînes de symboles.



### *1.1.3. Caractérisation théorique du mécanisme d'encodage position-spécifique.*

#### **1.1.1.1. Les mécanismes visuo-attentionnels génériques sous-jacents au mécanisme d'encodage position spécifique.**

La fonction sérielle de position en W observée pour les lettres, traduisant l'activité du mécanisme EPS, s'expliquerait par les contraintes qu'exerce le système visuo-attentionnel sur le processus d'identification visuelle des lettres. Grainger et al. (2016) identifient deux contraintes principales qui vont influencer la visibilité des lettres (voir Figure 9) :

- **L'acuité** : plus une lettre est proche du point de fixation, plus cette lettre est visible. En effet, les lettres proches du point de fixation sont projetées dans la zone fovéale où l'acuité est maximale. Cette contrainte explique le bénéfice observé pour le report du caractère central dans la tâche TSI.
- **L'encombrement visuel (*crowding* en anglais)** : la visibilité d'un caractère est réduite si celui-ci est entouré d'autres caractères à des positions spatiales proches (pour une revue de la littérature, voir Levi, 2008; Pelli & Tillman, 2008; Whitney & Levi, 2011).

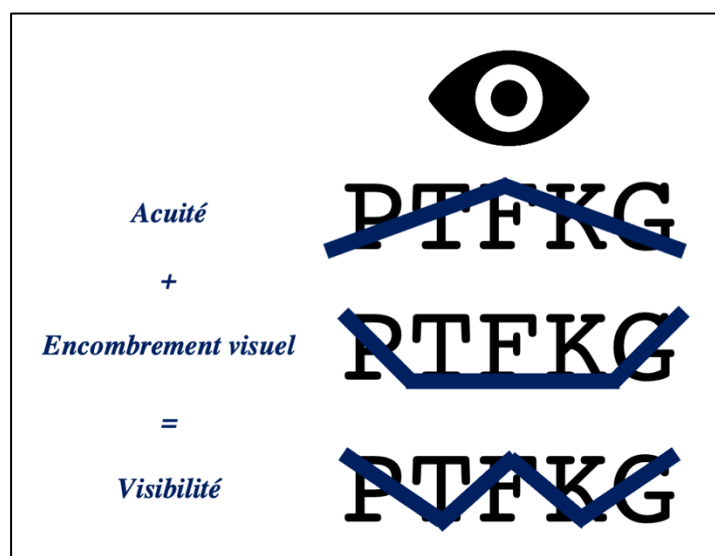


Figure 9. Illustration adaptée de Grainger et al. (2016) représentant l'influence combinée des mécanismes d'acuité et d'encombrement visuel.

Dans la tâche TSI, les lettres externes bénéficient d'un encombrement visuel réduit, car celles-ci ne sont entourées que d'une seule lettre ce qui renforce leur visibilité.

Néanmoins, ces contraintes visuo-attentionnelles devraient néanmoins s'exercer de manière indifférenciée, quel que soit le type de chaînes de caractères (lettres, chiffres, symboles, etc.). Dès lors, comment expliquer qu'aucune fonction sérielle de position en W ne soit observée pour les chaînes de symboles ? En particulier, comment expliquer qu'aucun effet d'encombrement visuel ne soit observé pour les chaînes de symboles ?

#### **1.1.1.2. L'hypothèse de la modulation des contraintes visuo-attentionnelles par la complexité visuelle des caractères**

Une première proposition formulée par Bernard et Chung (2011) serait que la complexité visuelle<sup>5</sup> des caractères influence les effets d'encombrement visuel. Cette influence peut être observée dans une tâche consistant à identifier un caractère cible dans un trigramme, (e.g., identifier la lettre Z dans le trigramme CZV, voir par exemple Chung, 2007). Selon cette hypothèse de complexité visuelle, une intégration excessive des caractéristiques visuelles des flanqueurs (C et V) lors de l'identification du caractère cible (Z) est susceptible de générer un effet d'interférence (voir Pelli et al., 2004). Plus les caractères flanqués ont une complexité visuelle importante, plus la quantité d'information à intégrer est importante, ce qui augmente l'effet d'interférence (Bernard & Chung, 2011). Cet effet de complexité visuelle pourrait expliquer pourquoi l'encombrement visuel est moins important pour les lettres que pour les symboles en position externe. En effet, dans le cas des cibles externes, le symbole flanqué (\$&#), dont la complexité visuelle est plus importante que celle de la lettre flanquée (CZV), générerait un effet d'encombrement visuel maximal lors de l'identification du symbole cible (\$&#), alors que cet effet serait moins important lors de l'identification de la lettre cible (CZV).

---

<sup>5</sup> L'opérationnalisation de la complexité visuelle utilisée par Bernard et Chung (2011) consiste à mesurer la longueur du squelette, i.e. la longueur totale des traits, de chaque lettre. Par exemple, la lettre "g" en Times New Roman a une complexité visuelle plus importante que la lettre "g" en Courier New car la longueur de son squelette est plus élevée.

Par conséquent, du fait de leur complexité visuelle réduite, les lettres sont plus facilement identifiables que les symboles lorsqu'elles se situent dans des positions externes.

Cette hypothèse est toutefois remise en question par certaines données empiriques. Tydgate et Grainger (2009) ont montré que la fonction sérielle de position en W pour les lettres était préservée même lorsque les éléments flanqués étaient de la catégorie opposée. En particulier, l'avantage de la première lettre était présent lorsqu'il s'agissait de retrouver une lettre entourée de symboles (V&?&\$#), alors que cet avantage était absent lorsqu'il s'agissait de trouver un symbole entouré de lettres (&VZRT). De plus, Chanceaux et Grainger (2012) ont observé que les fonctions sérielles de position pour les chaînes de lettres présentées en vision périphérique différaient de celles de chaînes de formes géométriques simples. Contrairement aux chaînes de lettres, les chaînes de formes géométriques simples ne présentaient pas d'avantage pour l'identification des formes externes, en dépit du fait que ces formes avaient une complexité visuelle proche de celle des lettres. Ces résultats suggèrent que la complexité visuelle des flanqueurs n'est pas l'unique paramètre influençant la fonction sérielle de position.

#### **1.1.1.3. L'hypothèse de l'adaptation des mécanismes visuo-attentionnels**

Les résultats décrits dans la section précédente ont conduit Tydgate et Grainger (2009) à formuler une hypothèse alternative, appelée hypothèse des Champs Récepteurs Modifiés (CRM). Cette hypothèse vise à expliquer les différences observées dans les fonctions sérielles de positions en fonction du type de caractère. Elle part du postulat que le traitement en parallèle de plusieurs lettres impose de fortes contraintes d'encombrement visuel du fait de la proximité spatiale des lettres au sein du mot auxquelles l'apprenti lecteur devra s'adapter. Au cours de l'apprentissage de la lecture, les lettres, initialement perçues comme n'importe quel objet visuel, deviennent un objet visuel spécifique, de nature orthographique (voir Grainger & Hannagan, 2014). Ce changement de statut conduirait au développement du mécanisme EPS grâce à la

spécialisation de détecteurs de lettres centrés sur le regard (DLCR) dont l'activité génère la fonction sérielle en W décrite plus haut.

Selon Tydgat et Grainger (2009), les champs récepteurs de DLCR se caractérisent par une étendue spatiale réduite comparés aux détecteurs dédiés à l'identification d'autres objets visuels. Le champ récepteur d'un détecteur correspond à la zone du champ visuel couverte par celui-ci. Selon la loi de Bouma (1973), plus le détecteur se trouve déplacé du point de fixation, plus la zone du champ visuel couverte par ce détecteur est large, et plus les informations adjacentes sont susceptibles d'influencer l'activité du détecteur. Cette hypothèse peut être illustrée en considérant une chaîne de trois caractères. Si les champs récepteurs des DLCR ont une large étendue spatiale, alors la zone du champ visuel couverte par ceux-ci s'étend au-delà de la lettre cible (voir Figure 10.A). À l'inverse, si les champs récepteurs ont une étendue spatiale étroite, alors la zone du champ visuel couverte par ceux-ci est limitée à la lettre cible (voir Figure 10.B). Ainsi, plus le champ récepteur d'un détecteur est étendu, plus les informations des caractères adjacents sont susceptibles d'être intégrées dans le traitement du caractère cible, et plus le niveau d'interférence lié à l'encombrement visuel sera important. C'est pour limiter l'effet de l'encombrement visuel que Tydgat et Grainger (2009) proposent que l'étendue spatiale des champs récepteurs des DLCR soit réduite comparativement aux champs récepteurs des détecteurs d'autres objets visuels.

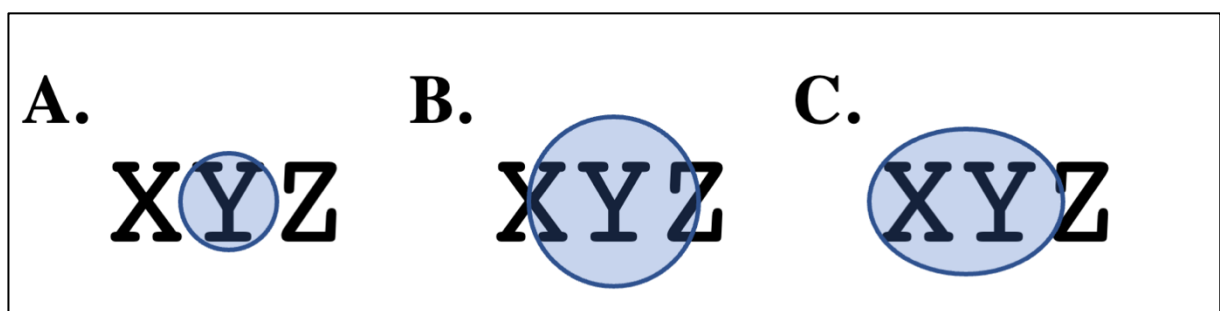


Figure 10. Représentation schématique des champs récepteurs de la lettre B (en bleu) pour (A) une étendue spatiale étroite, (B) une étendue spatiale large et (C) une élongation de l'étendue spatiale vers la gauche. Dans le cas d'une étendue spatiale large (B), le champ récepteur de la lettre B est sensible aux interférences des deux lettres adjacentes (A et C). Dans le cas d'une élongation de l'étendue spatiale vers la gauche (C), le champ récepteur de la lettre B est uniquement sensible à l'interférence de la lettre se situant à gauche (A).

Tydgat et Grainger (2009) proposent également que la forme des champs récepteurs DLCR soit modifiée. Cette modification viserait à améliorer le traitement de la première lettre du mot, car celle-ci est jugée critique. Premièrement, la première lettre permettrait de contraindre l'accès lexical plus qu'aucune autre lettre dans le mot (e.g., Clark & O'Regan, 1999; Grainger & Jacobs, 1993). Deuxièmement, la première lettre est considérée comme critique pour pouvoir convertir le code orthographique en code phonologique, car cette conversion grapho-phonémique nécessite de disposer d'une information de position précise (Perry et al., 2007). Empiriquement, cet avantage de la première lettre est corroboré par l'observation d'une asymétrie dans la forme en W de la fonction sérielle de position qui se caractérise par de meilleurs taux de report pour la première lettre du mot que pour la dernière (e.g., Tydgat & Grainger, 2009). L'avantage de la première lettre serait donc additif à l'effet d'encombrement visuel observé pour les lettres externes. D'après l'hypothèse des champs récepteurs modifiés, ce résultat s'expliquerait par une élongation vers la gauche des champs récepteurs des détecteurs de lettres se trouvant dans le champ visuel gauche (voir Figure 10.C). Par ailleurs, en considérant que la zone du champ visuel couverte par chaque champ récepteur à une excentricité donnée est constante, alors les champs récepteurs du champ visuel gauche devraient avoir une étendue verticale réduite (du fait de leur élongation sur le plan horizontal) par rapport aux champs récepteurs du champ visuel droit qui devraient être circulaires. Cette hypothèse a été confirmée par Grainger et al. (2010). Dans cette expérience, les participants devaient identifier un caractère (lettre vs. symbole) se trouvant à gauche ou à droite du point de fixation (Champ Visuel Gauche – CVG – vs. Champ Visuel Droit – CVD). Ce caractère pouvait être flanqué par un caractère de la même catégorie à gauche ou à droite. Dans le CVD, aucune différence de précision dans le report du caractère cible n'a été observée quel que soit le type de caractère (lettre/symbole) et quelle que soit la position du caractère flanqué (gauche/droite). En revanche, dans le CVG, une différence apparaît entre les lettres et les symboles. Alors que

l'identification d'un symbole cible est affectée de manière équivalente par la présence d'un flanqueur à gauche ou à droite ( $\&\$ \Leftrightarrow \$\& \cdot$ ), l'identification d'une lettre cible est plus perturbée par la présence d'un flanqueur à gauche ( $C\underline{Z} \cdot$ ) que par la présence d'un flanqueur à droite ( $\underline{Z}C \cdot$ ). Ce résultat conforte l'idée que les champs récepteurs des DLCR se trouvant dans le champ visuel gauche sont élargis vers la gauche. Par conséquent, pour une excentricité donnée, une lettre externe se trouvant dans le CVG sera moins sensible aux effets d'encombrement visuels de la lettre adjacente que ne le serait une lettre externe se trouvant dans le CVD (voir Figure 11). Ce résultat explique pourquoi la fonction sérielle de position en W est asymétrique, c'est-à-dire que le report de la première lettre est plus précis que celui de la dernière lettre.

L'adaptation des champs récepteurs sous-tendant le développement des DLCR décrites ci-dessus a pour effet d'optimiser l'identification des chaînes de lettres sur l'axe horizontal. Le traitement des lettres sur un axe vertical est par contre insensible à cette adaptation des champs récepteurs des DLCR comme établi par Vejnović et Zdravković (2015) qui montrent que les effets d'encombrement visuels agissent de manière indifférenciée sur les chaînes de lettres et symboles lorsque celles-ci sont organisées sur le plan vertical.

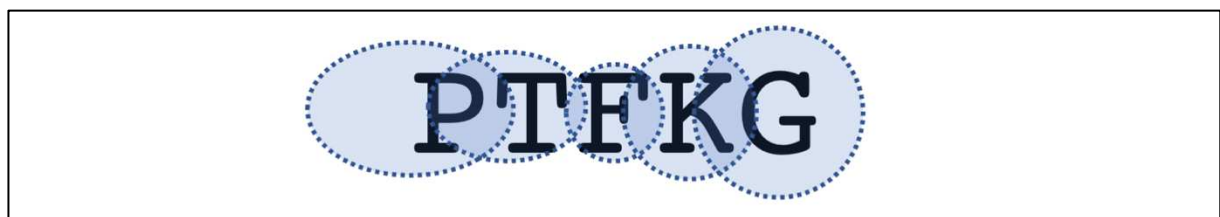


Figure 11. Illustration de l'hypothèse des champs récepteurs modifiés de Grainger et Tydgate (2009). La taille des champs récepteurs sont supposés changer en fonction de l'excentricité et du champ visuel (gauche vs. droite). La taille des champs récepteurs augmente avec l'excentricité et deviennent allongés vers la gauche dans le champs visuel gauche. L'illustration représente les champs récepteurs pour une chaîne aléatoire de consonnes avec une fixation sur la lettre centrale.

#### ***1.1.4. Développement du mécanisme d'encodage position-spécifique au cours de l'apprentissage de la lecture.***

L'une des prédictions clés de l'hypothèse des Champs Récepteurs Modifiés décrite dans la section précédente est que la modification des champs récepteurs des DLCR s'opère au cours

de l'apprentissage de la lecture. Au début de l'apprentissage de la lecture, puisque les champs récepteurs des DLCR n'ont pas encore subi de modification, la fonction sérielle de position pour les lettres devrait être proche de celle des symboles (forme en  $\Lambda$ ). Ce n'est qu'une fois que les champs récepteurs auront été modifiés que la différence entre les fonctions sérielles de position pour les lettres et les symboles pourra être observée (voir Figure 12).

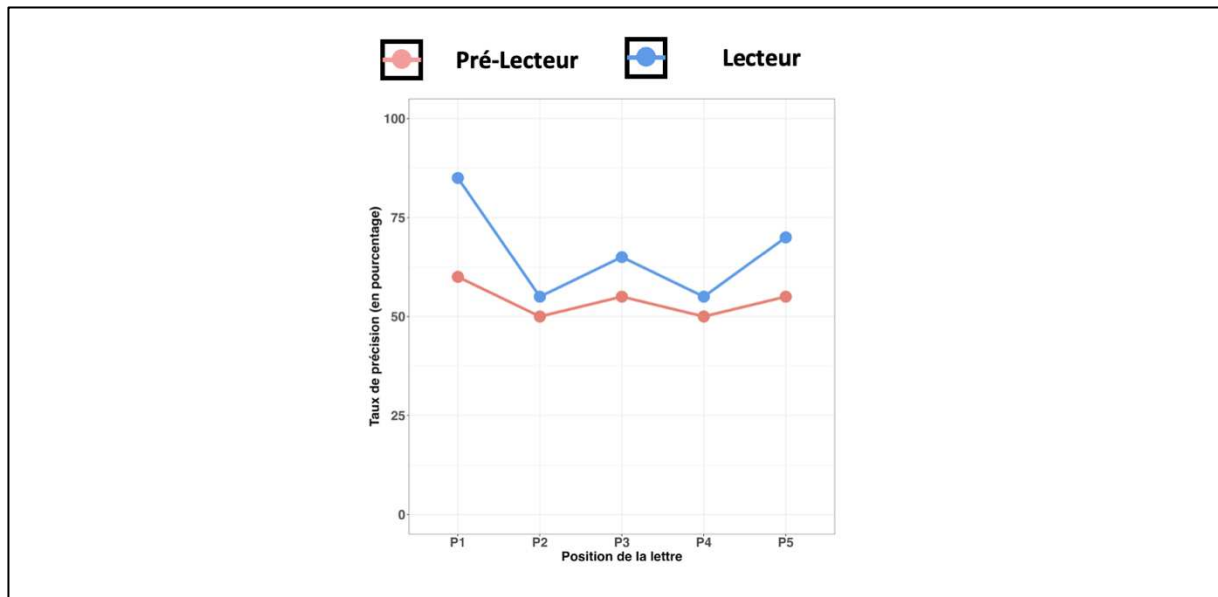


Figure 12. Fonction de position sérielle typique pour les chaînes de lettres chez l'enfant avant d'apprendre à lire (en rouge) et après avoir appris à lire (en bleu).

Ce pattern développemental est consistant avec les observations de Grainger et al. (2016) dans une étude utilisant le paradigme TSI à 2AFC (*two-alternative forced-choice*). Les auteurs ont comparé le traitement de chaînes de lettres et de formes géométriques chez des enfants du CP au CM2. Les résultats ont montré qu'au cours de l'apprentissage de la lecture, un avantage pour le report du premier caractère émergeait pour les chaînes de lettres mais pas pour les chaînes de formes géométriques. Toutefois, les auteurs ne sont pas parvenus à mettre en évidence l'émergence d'une fonction sérielle de position en W complète : aucun avantage pour le report du dernier caractère n'a été mis en évidence que ce soit pour les chaînes de lettres ou pour les chaînes de formes géométriques. Ce résultat pourrait s'expliquer par des considérations méthodologiques. En effet, Grainger et al. (2016) relève que la procédure à 2AFC avait déjà échoué à révéler un avantage pour le report de la dernière position chez Tydgat

et Grainger (2009). Cette observation est corroborée par les résultats de Schubert et al. (2017) qui ont étudié le traitement de chaînes de lettres, de chiffres et de symboles en utilisant le paradigme TSI à 9AFC chez des enfants du CP à la sixième. L'utilisation de cette modalité de réponse a permis de faire émerger l'avantage pour l'identification des lettres aux positions externes, cet avantage n'étant pas observé pour les symboles.

L'émergence de cette fonction sérielle de position, témoignant du développement des DLCR, ne serait pas compromise dans le cas de la dyslexie développementale. Ziegler et al. (2010) ont effectivement montré que des enfants dyslexiques (âgés de 8 à 12 ans) montraient la même fonction sérielle de position en W pour les lettres que les enfants normo-lecteurs, bien que leur niveau de performance globale soit plus faible. Ce résultat traduit le fait que les DLCR, bien qu'étant moins efficaces, sont néanmoins fonctionnels chez l'enfant dyslexique.

Toutefois, comme le soulignent Schubert et al. (2017), les facteurs guidant la modification des champs récepteurs des DLCR au cours de l'acquisition de la lecture restent à éclaircir. Sur cette question, Grainger et al. (2012) indiquent que la modification des champs récepteurs des DLCR serait guidée par « la volonté de l'apprenti lecteur de traiter plus efficacement les informations orthographiques par le biais du traitement des lettres en parallèle ». Cette proposition reste à explorer pour expliquer notamment comment les enfants seraient capables de piloter une telle démarche et d'estimer leur capacité à traiter efficacement les informations orthographiques. Des études supplémentaires sont donc nécessaires pour préciser les facteurs potentiels guidant la modification des champs récepteurs des DLCR, tels que l'enrichissement du lexique orthographique, la quantité d'exposition à l'écrit ou encore le remplacement des traitements sériels par des traitements parallèles. Ces investigations n'entrent toutefois pas dans le cadre de la présente thèse.



### ***1.1.5. L'encodage de l'information de position par le mécanisme d'encodage position-spécifique***

Si le mécanisme EPS par le biais des DLCR permet d'optimiser l'encodage de l'identité de certaines lettres au sein des chaînes de lettres, les DLCR encodent également l'information sur leur position. En effet, les lettres et les chiffres sont très souvent des éléments de chaînes combinatoires. De fait, connaître la position de ces éléments est crucial pour pouvoir distinguer le mot "mairie" du mot "marie" ou le chiffre 9121 du chiffre 1921, d'autant plus s'il s'agit du montant des impôts à payer ! Les DLCR permettent d'encoder une première information de position qui dépend du référentiel rétinotopique associé à la zone où le regard se pose. Cette information de position est invariante d'échelle, c'est-à-dire qu'elle ne se modifie pas quelle que soit la distance qui existe entre l'œil et la page. La distance des lettres par rapport au point de fixation peut donc être mesurée en unité de lettres plutôt qu'en degré d'angle visuel (Hautala & Loberg, 2015). Par exemple, dans la Figure 13, si le regard du lecteur se fixe au centre du mot TABLE, la lettre A se situera à une unité à gauche du regard ( $x=-1$ ) ; si le regard se fixe sur la lettre L, la lettre A se situera désormais à deux unités à gauche du regard ( $x=-2$ ). Ce code "position-spécifique" devra être transformé en code "position-invariant" dans les étapes ultérieures de traitement orthographique afin de ne plus dépendre de la position du regard (voir [la Section dédiée au mécanisme EPI, p.44](#)).

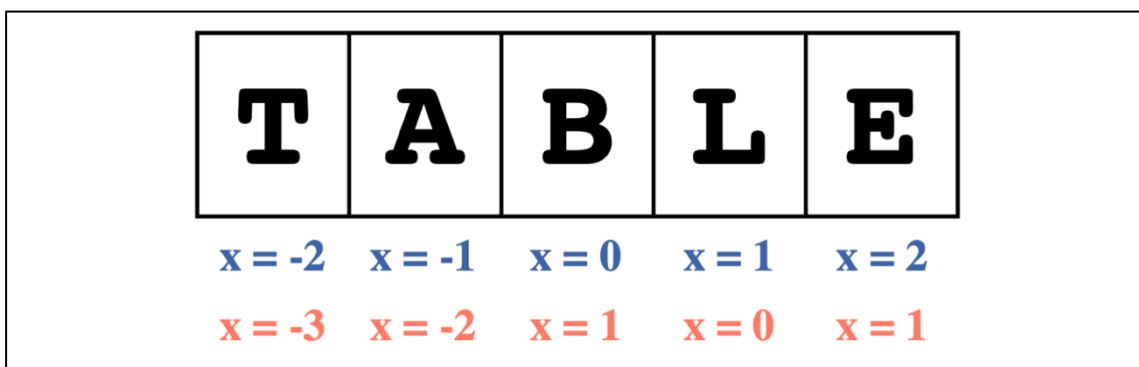


Figure 13. Représentation schématique de l'encodage de l'information de position par le mécanisme EPS en fonction de la position du regard. Les coordonnées bleues sont données pour une position du regard sur la lettre B ; les coordonnées rouges sont données pour une position du regard sur la lettre L.

### *1.1.6. Synthèse*

Dans le cadre de l'architecture du traitement orthographique de Grainger et al. (2016), le mécanisme d'Encodage Position-Spécifique est implémenté par des détecteurs de lettres centrés sur le regard (DLCR). Le rôle des DLCR est d'assurer l'encodage de l'identité et la position des lettres au sein des chaînes de lettres présentées horizontalement, l'information sur la position des lettres étant encodée dans un référentiel rétinotopique. La spécificité de ces détecteurs réside dans l'adaptation des mécanismes visuo-attentionnels pour optimiser le traitement en parallèle de l'identité et de la position des lettres au sein des chaînes de lettres. Cette adaptation résiderait dans la modification de deux propriétés des champs récepteurs des DLCR : (1) leur taille, qui est réduite afin d'éviter des effets d'encombrement visuel liés à la présence des lettres adjacentes et (2) une élongation vers la gauche des champs récepteurs se trouvant dans le champ visuel gauche afin de favoriser le traitement de la première lettre. Cette adaptation surviendrait dès que l'enfant s'engage dans une démarche active d'apprentissage de la lecture, bien que les facteurs sous-jacents restent à élucider. Enfin, l'activité des DLCR peut être mise en évidence à l'aide du paradigme TSI dans lequel les participants rappellent plus facilement les lettres externes et la lettre centrale de la chaîne de lettres qui leur est présentée. Dans ce cadre, l'avantage de la première lettre est considéré comme la signature empirique la plus saillante de l'activité des DLCR.

## 1.2. Le mécanisme d'encodage position invariant (EPI)

Selon Grainger (2018), le second aspect du développement de l'expertise orthographique concerne la mise en place d'un mécanisme d'Encodage Position-Invariant (EPI). Cet encodage vise à rendre les informations sur l'identité et la position des lettres fournies par le mécanisme EPS indépendantes du référentiel rétinotopique afin d'accéder aux représentations orthographiques des mots. Sur la base du modèle à double voie du traitement orthographique de Grainger et Ziegler (2011), l'architecture de Grainger et al. (2016) propose deux schémas d'encodage position-invariant qui doivent permettre l'accès à l'une des deux voies de lecture présentées en introduction : la voie directe et la voie indirecte. La voie directe permettrait l'activation des représentations sémantiques via l'accès aux représentations orthographiques, alors que la voie indirecte nécessiterait un adressage des représentations phonologiques pour activer ces représentations sémantiques. Cet adressage phonologique nécessite de connaître précisément l'ordre des lettres, car une simple transposition dans l'ordre des lettres peut modifier le phonème encodé (e.g., il ® /il/ vs. li ® /li/ ). De ce fait, le recours à la voie indirecte nécessite un encodage position-invariant de haute précision, appelé encodage à grains fins. En revanche, dans l'autre voie, l'accès direct aux représentations orthographiques ne nécessiterait pas une information aussi précise sur la position des lettres. Un autre schéma d'encodage position-invariant serait utilisé, l'encodage à grains larges, qui serait plus tolérant à des petites violations de la position des lettres. Par exemple, lors de l'utilisation du code à grains larges, l'identification du mot écrit "ambulance" ne serait que peu dégradée dans le cas d'une permutation de lettres comme dans "ambulacne". En termes de traitement de l'information, la voie indirecte privilégie la précision de l'information encodée au détriment de la rapidité, alors que la voie directe privilégie la rapidité de l'encodage au détriment de la précision. Le recours à la voie directe est possible seulement si le mot est représenté dans le lexique orthographique ; elle est donc très utilisée par le lecteur expert. Le recours à la voie indirecte est rendu nécessaire

lorsque le mot n'est pas représenté dans le lexique orthographique (e.g., un mot inconnu ou peu familier) ; elle est donc très utilisée par l'apprenti lecteur. Dans le cadre de cette section, le focus sera porté sur la description du mécanisme EPS à grains larges du fait que cette modalité d'encodage est préférentiellement utilisée par le lecteur expert<sup>6</sup>.

### ***1.2.1. Paradigme d'étude de l'activité du mécanisme d'encodage position-invariant (EPI) à grains larges.***

L'activité du mécanisme EPI est traditionnellement étudiée dans une tâche de jugement perceptuel (*Same-Different Matching task*, SDM ci-après). Cette tâche est inspirée de celle utilisée antérieurement par Krueger (1978) et Ratcliff (1981). La version utilisée pour l'étude du mécanisme EPI consiste à présenter brièvement une première chaîne de 4 caractères pendant que le participant fixe le centre de l'écran. Cette chaîne de caractères est ensuite remplacée par une seconde chaîne de 4 caractères. Le participant doit décider le plus rapidement et le plus justement possible si les deux chaînes de caractères étaient identiques ou non. La procédure expérimentale est décrite dans la Figure 14.

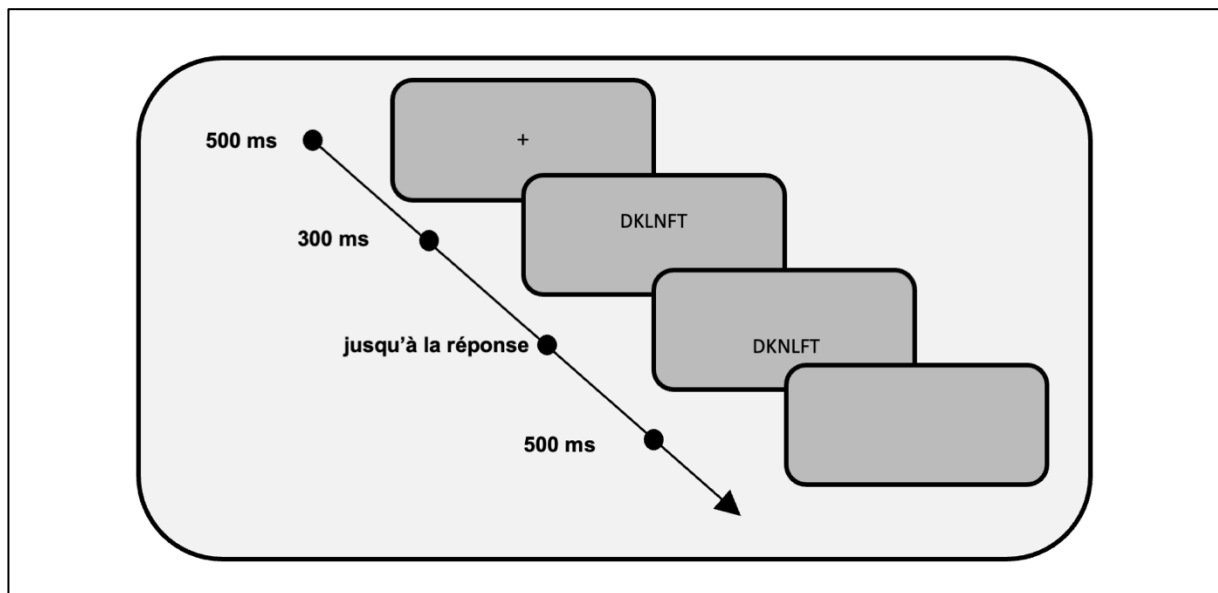


Figure 14. Illustration de la procédure expérimentale utilisée par Massol et al. (2013)

<sup>6</sup> Cette position est partagée par C. Whitney et Cornelissen (2008) qui indiquent que ce type d'encodage est « spécifique à la voie lexicale » (p. 16) et que celui-ci n'est pas adapté pour la génération du code phonologique.

### ***1.2.2. Signature empirique du mécanisme d'encodage position-invariant.***

Le résultat empirique clé obtenu dans le paradigme SDM indique qu'une différence entre deux chaînes de lettres est plus difficilement détectée dans le cas de transpositions de lettres (RZXT-RXZT) que dans le cas de substitutions de lettres (RZXT-RQBT). Cet effet de "Transposition de Lettres" (ci-après TL) est l'un des effets les plus reproductibles de la psychologie expérimentale. Celui-ci a été mis en évidence dans les études princeps de Bruner et O'dowd (1958), Chambers (1979) et Andrews (1996) puis a été investigué dans une large variété de contextes : en amorçage masqué<sup>7</sup>, en lecture de phrase (e.g., Blythe et al., 2014; Rayner et al., 2006), en décision lexicale (e.g., Frankish & Turner, 2007) ou encore, comme évoqué ci-dessus, lors de jugements perceptuels (e.g., Duñabeitia et al., 2012; Massol et al., 2013). Cet effet TL ne serait pas spécifique au primate humain puisqu'il a été observé chez des babouins réalisant une tâche de décision lexicale, ce qui suggère que le mécanisme sous-tendant cet effet n'est pas de nature linguistique (Grainger, Dufau, et al., 2012; Ziegler et al., 2013). De manière importante, cet effet de transposition est plus marqué pour les chaînes de lettres que pour les chaînes de chiffres (Duñabeitia et al., 2012; Massol et al., 2013). Ce dernier résultat suggère qu'il existe un mécanisme flexible d'encodage de la position qui est spécifique aux lettres.

---

<sup>7</sup> Dans le paradigme d'amorçage masqué (Forster & Davis, 1984), une amorce est présentée brièvement (généralement 50 ms) avant la présentation de la cible sur laquelle le participant doit effectuer une décision lexicale. Bien que les participants ne soient pas conscients de la présence de l'amorce, leur temps de décision est influencé par l'information contenue dans celle-ci. Dans le cas des effets TL, les amorces construites à partir du mot cible dans lequel deux lettres ont été transposées sont traitées plus rapidement que les amorces où ces mêmes lettres ont été substituées (e.g., caniso-CASINO vs. carivo-CASINO, Perea & Lupker, 2004). Les résultats obtenus en amorçage masqué pour les effets TL sont résumés comme suit par Grainger (2018) : (1) l'effet d'amorçage est meilleur lorsque la transposition de lettres implique au minimum une consonne (Lupker et al., 2008; Perea & Lupker, 2004), (2) l'effet d'amorçage diminue à mesure que la distance entre les lettres transposées augmente (Ktori et al., 2014; Perea et al., 2008) et (3) l'effet d'amorçage diminue lorsque la transposition de lettres implique une lettre externe (Johnson et al., 2007; Perea & Lupker, 2003).

### ***1.2.3. Caractérisation du mécanisme d'encodage position invariant.***

#### **1.2.3.1. La problématique d'un schéma d'encodage strict de la position des lettres.**

La richesse des investigations de l'effet TL décrites ci-dessus révèle l'intérêt pour l'une des problématiques principales des modèles d'identification du mot écrit : l'encodage de la position des lettres. Dans le très influent modèle de McClelland et Rumelhart (1981), l'encodage de la position des lettres est réalisé par un mécanisme dit de "slot-coding". Ce mécanisme assigne chaque lettre à une position spécifique, appelée slot. Par exemple, le mot TIR sera représenté sous le format  $T_1I_2R_3$ , où la lettre T est associée au slot 1, la lettre I au slot 2 et la lettre R au slot 3. Le mot TRI, quant à lui, sera représenté sous le format  $T_1R_2I_3$ . Cela signifie que les lettres R et I dans TIR et TRI sont des lettres différentes ( $I_2$  et  $R_3$  dans TIR, et  $R_2$  et  $R_3$  dans TRI). Bien que le mécanisme de slot-coding ait été implémenté dans de nombreux autres modèles, il rencontre des difficultés pour expliquer l'effet de transposition décrit plus haut (pour une présentation des différents modèles de codage, voir Davis & Bowers, 2006). En effet, si l'on considère la chaîne de lettres transposées (RZXT-RXZT) et la chaîne de lettres substituées (RZXT-RQBT) utilisées dans la tâche de jugement perceptuel, les encodages suivants sont respectivement obtenus :  $R_1X_2Z_3T_4$  et  $R_1Q_2B_3T_4$ . Selon le mécanisme de slot-coding les chaînes de lettres RXZT et RQBT n'ont donc que deux lettres en commun ( $R_1$  et  $T_4$ ). De manière corolaire, dans ces deux chaînes, l'identité des lettres aux slots 2 et 3 est incorrectement codée. Ainsi, puisque les deux chaînes partagent exactement la même information orthographique, leur similarité orthographique est identique et aucun effet de transposition ne devrait être observé.

#### **1.2.3.2. Le mécanisme de bruit de position, un mécanisme visuo-attentionnel pour expliquer la flexibilité de l'encodage de la position des lettres.**

Pour permettre de rendre compte des effets de transpositions de lettres, tout en conservant le mécanisme de slot-coding, certains auteurs ont proposé d'ajouter un paramètre de bruit dans l'assignation des lettres à un slot donné. Ce paramètre est appelé "bruit de position" (*letter-position noise* ; Gomez et al., 2008; Norris, 2006). Cette adaptation a été motivée par l'hypothèse que dans les étapes précoces du traitement orthographique, une incertitude sur la position exacte des lettres existe du fait d'un mécanisme visuo-attentionnel générant une incertitude sur l'assignation de la position des objets visuels (Ashby et al., 1996; Logan, 1996). Dans le cas des chaînes de lettres transposées (e.g., RZXT-RXZT), ce bruit de position induirait une incertitude quant à la position exacte des lettres les unes par rapport aux autres (e.g., sur le fait que la lettre X se trouve à gauche ou à droite de la lettre Z).

Bien que ce mécanisme de bruit de position permette d'expliquer les effets TL observés pour les chaînes de lettres, celui-ci présente des difficultés pour expliquer la supériorité de l'effet TL pour les chaînes de lettres relativement aux chaînes de chiffres. En effet, l'action du bruit de position devrait s'exercer de manière indifférenciée sur les chaînes de lettres et de chiffres, générant un effet TL similaire pour ces deux types de chaînes.

### **1.2.3.3. L'hypothèse d'un mécanisme position-invariant spécifique pour l'encodage de la position des lettres**

Pour expliquer la différence d'amplitude de l'effet TL entre les chaînes de chiffres et de lettres, Grainger (2018) postule un mécanisme spécifique d'encodage position-invariant pour les chaînes de lettres. Ce mécanisme EPI pourrait agir de manière additive avec le mécanisme de bruit de position. Le mécanisme EPI, implémenté dans l'architecture de Grainger et al. (2016), est réalisé grâce à l'activation de bigrammes de lettres. Ces représentations permettraient d'encoder la position des lettres dans un référentiel centré sur le mot, c'est-à-dire que la position des lettres est exprimée relativement aux lettres du mot et non plus par rapport à leur position absolue dans le référentiel rétinotopique. Par exemple, le mot TABLE serait codé par l'ensemble de bigrammes suivants : TA, TB, TL, TE, AB, AL, AE, BL, BE et LE. Le

bigramme est une représentation orthographique intermédiaire entre la lettre et le mot qui a été adoptée dans plusieurs propositions théoriques (Dehaene et al., 2005; Grainger et al., 2006; Grainger & van Heuven, 2003; Grainger & Whitney, 2004; C. Whitney, 2001; C. Whitney & Cornelissen, 2008). Deux caractéristiques des bigrammes, communes à l'ensemble de ces propositions, peuvent être identifiées. La première est que l'ordre des lettres est codé par des associations ordonnées de paires de lettres : le bigramme "TA" de "TABLE" permettra d'indiquer que le T se trouve à gauche de A. La seconde est que les bigrammes sont dits "ouverts" du fait qu'ils ne sont pas constitués uniquement de deux lettres contiguës, le nombre de lettres intercalaires dans un bigramme étant limité à deux : pour TABLE, les bigrammes TA, TB et TL du mot TABLE sont encodés, mais pas le bigramme TE. Du fait de ces propriétés, le codage par bigrammes ouverts permet de rendre compte de l'effet de transposition de lettres. Dans le cas de la tâche de jugement perceptuel, la chaîne de référence partage un plus grand nombre de bigrammes ouverts avec la chaîne de lettres transposées (RZXT-RXZT : RX, RZ, RT, XT, ZT = 5/6) qu'avec la chaîne de lettres substituées (RZXT-RQBT : RT = 1/6). De ce fait, la chaîne de lettres transposées sera jugée plus similaire à la chaîne de référence que la chaîne de lettres substituée.

Par ailleurs, ces bigrammes ouverts sont considérés comme spécifiques aux lettres : il n'existe pas de bigrammes pour les chiffres où les symboles. Ainsi, les effets de transpositions observés pour les chaînes de chiffres ou de symboles s'expliqueraient uniquement par l'action du mécanisme de bruit de position, alors que pour les chaînes de lettres, le mécanisme EPI, reposant sur l'activation des bigrammes ouverts<sup>8</sup>, et le mécanisme de bruit de position agissent

---

<sup>8</sup> Il faut noter que les représentations orthographiques en bigrammes de lettres ne constituent "qu'une implémentation possible du traitement à grains larges" (Grainger & Ziegler, 2011, p.4) et que "personne n'a encore pu observer des neurones bigrammes" (Dehaene, 2009). Il convient également de noter que ces représentations orthographiques n'ont pas été initialement proposées pour capturer les effets TL (Grainger, 2018). Pourtant, certains auteurs réfutent la nécessité d'invoquer des représentations en bigrammes dans la mesure où cette solution apparaît peu parcimonieuse (e.g., Kinoshita & Norris, 2013). En dépit de ces critiques, la nécessité de disposer d'un mécanisme transformant l'information position-spécifique en information position-invariante n'est pas remise



de manière additive. Cette proposition permet de rendre compte d'un plus large effet TL pour les chaînes de lettres relativement aux chaînes de chiffres ou de symboles.

#### ***1.2.4. Le développement du mécanisme d'encodage position-invariant au cours de l'apprentissage de la lecture.***

L'étude du développement du mécanisme EPI au cours de l'apprentissage de la lecture sous-tend deux problématiques :

- (1) La problématique liée à l'émergence du mécanisme EPI, c'est-à-dire le moment à partir duquel se manifestent des effets de transpositions spécifiques aux lettres.
- (2) La problématique liée à la spécialisation du mécanisme EPI, c'est-à-dire l'évolution de l'amplitude de l'effet de transposition de lettres au cours de l'acquisition de la lecture.

Ces deux problématiques seront traitées dans des sections distinctes ci-après.

##### **1.2.4.1. L'émergence du mécanisme d'encodage position-invariant au cours de l'apprentissage de la lecture.**

La difficulté de la réponse à la problématique de l'émergence du mécanisme EPI réside dans le fait de savoir si un mécanisme de bruit de position est également impliqué dans les effets de transpositions. En effet, si aucun mécanisme de bruit de position n'est impliqué, alors il suffit de déterminer à partir de quel moment les effets de transpositions de lettres apparaissent au cours du développement. Au contraire, si le mécanisme de bruit de position est l'une des sources des effets TL, alors il convient de déterminer quelle est la part imputable à ce mécanisme et quelle est la part imputable au mécanisme EPI. Il convient alors de déterminer à quel moment du développement les effets de transpositions de lettres deviennent plus importants que les

---

en question et demeure au cœur des préoccupations des modèles computationnels du traitement orthographique. L'objectif de cette thèse n'est pas de trancher sur cette question mais d'examiner comment les différents mécanismes orthographiques coévoluent. Dans ce cadre, l'opérationnalisation exacte des mécanismes EPS et EPI ne doit pas être considéré comme la question de recherche centrale.

effets de transpositions de chiffres ou de symboles. Les données soutenant ces deux approches sont décrites ci-après.

#### ***1.2.4.1.1. Le mécanisme EPI comme seule source des effets de transpositions de lettres.***

La contribution unique du mécanisme EPI dans la génération des effets TL est soutenue par des résultats obtenus chez l'adulte illettré. Cette population pourrait dans une certaine mesure être assimilée à celle des enfants pré-lecteurs puisqu'elle n'a jamais automatisé les processus d'identification du mot écrit. Dans une étude auprès de cette population, Duñabeitia et al. (2014) ont mis en évidence que les personnes illettrées ne montraient aucun effet de transposition, que ce soit pour les chaînes de lettres ou de symboles. Selon les auteurs, ce résultat serait la preuve qu'aucun mécanisme de bruit de position n'agit dans l'assignation des positions des éléments des chaînes de caractères. Si tel avait été le cas, alors un effet de transposition équivalent aurait dû être trouvé chez les personnes illettrées pour les chaînes de lettres et de symboles. Duñabeitia et al. (2014) concluent que les effets de transposition de lettres sont la conséquence du développement du mécanisme EPI rendu possible par la pratique de la lecture.

Dans cette ligne de recherche, Duñabeitia et al. (2015) ont tenté de terminer à partir de quel moment émergeait le mécanisme EPI au cours de l'apprentissage de la lecture. Pour ce faire, les auteurs ont évalués longitudinalement la performance d'une cohorte d'enfants de 4 à 6 ans à une tâche de jugement perceptuel. Chaque année, les enfants ont réalisé une tâche de jugement perceptuel dans laquelle ils devaient comparer des paires de lettres identiques (rzsk-rzsk), transposées (rzsk-rszk) et substituées (rzsk-rhck). Les résultats ont révélé que lors des deux premières années, lorsque les enfants étaient encore des pré-lecteurs, aucun effet de transposition n'a été trouvé. Ce n'est que lors de la dernière année, lorsque les enfants avaient reçu un enseignement explicite à la lecture, que l'effet de transposition de lettres émergeait. Ce

résultat a été interprété comme étant la preuve que la mise en place du mécanisme EPI résultait de l'exposition à l'écrit. De plus, l'absence d'effet de transposition chez les pré-lecteurs était conforme avec l'hypothèse que les effets TL n'étaient pas générés par un mécanisme de bruit de position.

En résumé, ces données suggèrent que les effets TL sont exclusivement générés par l'acquisition du mécanisme EPI, l'acquisition de ce mécanisme étant rendu possible par la pratique de la lecture.

#### ***1.2.4.1.2. L'additivité du mécanisme de bruit de position et du mécanisme EPI comme sources des effets TL.***

L'exclusivité du mécanisme EPI comme source des effets TL a rapidement été remise en question par certains auteurs. Ces critiques reposent principalement sur des arguments de nature méthodologique.

Le premier argument avancé est qu'aucune assimilation directe ne peut être établie entre les populations illettrées et pré-lectrices. Les pré-lecteurs, par leur scolarisation et leur environnement socioculturel, sont déjà familiers avec les caractères écrits (lettres, symboles, chiffres) même s'ils ne se sont pas encore engagés dans l'apprentissage de la lecture. En revanche, les personnes illettrées ont été moins exposées aux caractères écrits et sont donc moins familières avec ceux-ci. Or, selon Perea et al. (2015), l'action du mécanisme de bruit de position est conditionnée à la familiarité avec les caractères écrits. Les personnes illettrées n'étant pas familières avec les caractères écrits, le mécanisme de bruit de position ne peut pas agir chez elles. En revanche, chez les personnes familiarisées avec les caractères écrits, plus le degré de familiarité sera élevé, plus l'accès à l'identité des caractères pourra se faire rapidement et plus le mécanisme de bruit de position sera susceptible d'exercer une influence (García-Orza et al., 2010). En effet, plusieurs études chez la population adulte normo-lectrice suggèrent que la familiarité des caractères (p. ex., lettre vs. pseudo-lettres) influence l'amplitude des effets de

transposition (García-Orza et al., 2010; Perea et al., 2015). Ces données suggèrent donc qu'un mécanisme de bruit de position est à l'œuvre dans les effets de transpositions chez l'individu normo-lecteur adulte.

Un second argument avancé par Perea et al. (2016) est que l'absence d'effet TL chez les enfants pré-lecteurs témoigne plus de leur incapacité à réaliser la tâche que de l'absence d'un mécanisme de bruit de position. En effet, Perea et al. (2016) soulignent que l'index de sensibilité (d') des enfants pré-lecteurs dans l'étude de Duñabeitia et al. (2015) était égal à 0, c'est-à-dire qu'ils rencontraient des difficultés à effectuer la tâche de jugement perceptuel. Cette sensibilité nulle rendait difficilement interprétable l'absence d'effet TL. Pour appuyer leur commentaire, Perea et al. (2016) ont administré une version modifiée de la tâche de jugement perceptuel à des enfants de 4 ans. L'objectif était que les enfants soient capables de réaliser la tâche au-delà du niveau de la chance. En diminuant les ressources demandées par la tâche, les auteurs ont observé que les enfants exhibaient des effets TL. Ces enfants, étant pré-lecteurs, n'avaient pas reçu d'entraînement à la lecture et n'avaient donc pas pu développer un mécanisme EPI. De ce fait, les effets TL observés pouvaient uniquement s'expliquer par le mécanisme de bruit de position. Ces données suggèrent qu'un mécanisme de bruit de position est à l'œuvre dans les effets de transposition chez l'individu pré-lecteur, comme chez l'individu normo-lecteur adulte.

#### ***1.2.4.1.3. Synthèse sur l'étude de l'émergence du mécanisme EPI au cours de l'apprentissage de la lecture.***

Les données présentées ci-dessus convergent pour affirmer que les apprentis lecteurs sont sensibles aux effets TL de manière très précoce. Toutefois, la plausibilité que l'effet TL puisse être en partie sous-tendu par un mécanisme de bruit de position rend difficile la détermination exacte du moment à partir duquel émerge le mécanisme EPI. Comme le soulignent Fernández-López et al. (2021), une étude explorant longitudinalement le traitement des chaînes de lettres et des chiffres chez l'enfant est nécessaire. En effet, pour pouvoir statuer sur l'émergence du

mécanisme EPI, il est nécessaire de mettre en évidence que les effets de transpositions deviennent plus importants pour les chaînes de lettres que pour les chaînes de chiffres ou de symboles au cours de l'apprentissage de la lecture. À ce jour, aucune donnée de ce type n'est disponible.

### ***1.2.5. La spécialisation du mécanisme d'encodage position-invariant au cours de l'apprentissage de la lecture.***

Comme le résumant Gomez et al. (2021), le débat sur la spécialisation du mécanisme EPI au cours de l'apprentissage de la lecture s'articule autour de deux lignes de recherches.

La première ligne de recherche, reprise par Grainger et al. (2016), s'appuie sur le modèle développemental à double voie de Grainger et Ziegler (2011). Dans le cadre de ce modèle, l'augmentation de l'effet TL témoignerait du recours accru à la voie à grains larges sous-tendu par le développement du mécanisme EPI implémenté par les représentations orthographiques en bigrammes ouverts. Ainsi, ce modèle prédit que l'effet TL devrait augmenter au cours de l'apprentissage de la lecture, et cela au moins jusqu'à ce que le lexique orthographique soit stabilisé. Les prédictions faites par cette équipe de recherche ont été confirmées dans deux études transversales menées auprès d'enfant de la 1<sup>ère</sup> à la 5<sup>ème</sup> année d'apprentissage de la lecture. Dans une première étude, Grainger, Lété, et al. (2012) ont montré que l'âge de lecture des enfants était corrélé positivement à la taille des effets TL obtenu dans une tâche de décision lexicale. Ce résultat a été répliqué avec succès par Ziegler et al. (2014) dans une tâche de décision lexicale en amorçage masqué sandwich. Des études ultérieures ont permis de confirmer une augmentation de l'effet TL en amorçage masqué chez les apprentis lecteurs italien (Colombo et al., 2019; Spinelli et al., 2022) et en mouvements oculaires chez les apprentis lecteurs allemands (Tiffin-Richards & Schroeder, 2015). Par ailleurs, en accord avec les éléments développés ci-dessus, une étude de Tóth & Csépe (2017) s'est intéressée à la spécialisation du mécanisme EPI en comparant les effets de transpositions obtenus pour quatre

types de chaînes de caractères (mots, pseudo-mots, pseudo-lettres, chiffres) chez des enfants allant de la 2<sup>ème</sup> à la 4<sup>ème</sup> année. Les résultats ont révélé que l'effet de transposition pour les chaînes de lettres augmentait avec le niveau de lecture, alors que cet effet demeurait stable pour les trois autres types de chaînes. Ce résultat est conforme avec l'idée qu'un mécanisme de bruit de position s'exerce quel que soit le type de chaînes de caractères, et qu'un mécanisme additionnel (i.e., le mécanisme EPI), dépendant du niveau de lecture, s'applique exclusivement aux chaînes de lettres.

Une seconde ligne de recherche propose que les effets TL doivent diminuer avec le gain d'expertise en lecture. Les propositions théoriques soutenant cette perspective défendent que les meilleurs lecteurs disposent de représentations orthographiques plus stables que les moins bons lecteurs (hypothèse de qualité lexicale, voir Perfetti, 2017; Perfetti & Hart, 2002). Ce développement du lexique orthographique impliquerait d'encoder de manière de plus en plus stricte la position des lettres (hypothèse du renforcement lexical, voir Castles et al., 2007). Cet encodage plus strict de la position des lettres permettrait notamment d'améliorer la capacité à distinguer les voisins orthographiques, tels que "cire" et "lire" ou "rire" et "rare". Ainsi, ces hypothèses prédisent que l'incertitude dans l'encodage de la position des lettres devrait diminuer avec l'expertise en lecture, ce qui devrait entraîner une diminution de l'effet TL. Cette prédiction est soutenue par plusieurs études utilisant des tâches de décision lexicale en amorçage masqué montrant une diminution ou un effacement de l'effet TL au cours de l'apprentissage de la lecture (en anglais, Castles et al., 2007; en français, Lété & Fayol, 2013; en espagnol, Acha & Perea, 2008).

Au vu des données actuellement disponibles, les hypothèses proposées par les deux lignes de recherche demeurent plausibles. La difficulté d'opter pour l'une ou l'autre alternative réside dans la comparaison des études les soutenant. En effet, Hasenäcker et Schroeder (2022) identifient trois facteurs qui pourraient limiter l'interprétation croisée des études : (1) le choix

de la condition contrôle utilisée dans les tâches d'amorçage masqué, (2) l'analyse des données obtenues sur le traitement des non-mots qui est généralement négligée et (3) le rôle des différences inter-individuelles telle que la connaissance orthographique. En prenant en compte ces trois facteurs, Hasenäcker et Schroeder (2022) ont investigué longitudinalement le développement de l'effet TL chez des enfants allemands de la 2<sup>ème</sup> à la 4<sup>ème</sup> année d'apprentissage de la lecture. Les résultats ont révélé que l'effet d'amorçage entre la condition TL (strom-STORM) et la condition contrôle (flinz-STORM) augmentait au cours de l'apprentissage de la lecture, ce qui suggère une augmentation de flexibilité du codage. Toutefois, les auteurs ont également observé que l'effet d'amorçage entre la condition TL (strom-STORM) et la condition identité (storm-STORM) augmentait au cours de l'apprentissage. Ce résultat indique que comparativement à une condition où l'amorce fournit toute l'information pour l'accès lexical (storm-STORM), l'information fournie par la condition TL (strom-STORM) devient moins informative pour l'accès lexical au cours de l'apprentissage de lecture. Ainsi, au cours du développement, l'accès lexical tolérerait de moins en moins les transpositions de lettres, ce qui témoignerait d'un encodage plus strict de la position des lettres. En somme, comme le reconnaissent Hasenäcker et Schroeder (2022), cette étude qui visait à dépasser les limitations des précédentes, fournit finalement des arguments qui peuvent être partiellement accommodés par les deux lignes de recherches présentées ci-dessus. À ce jour, aucune donnée ne permet donc de formellement trancher entre celles-ci.

### 1.2.6. Synthèse

Dans le cadre de l'architecture du traitement orthographique de Grainger et al. (2016), le mécanisme d'Encodage Position-Invariant est implémenté par des représentations orthographiques en bigrammes ouverts. Leur rôle est de permettre d'assurer la flexibilité du codage orthographique afin de le rendre tolérant à de faibles déplacements de position des lettres. L'émergence de ces représentations est dépendante de l'apprentissage de la lecture. La manifestation comportementale de ce mécanisme réside dans l'effet de transposition de lettres (TL). Cet effet reflète la tendance des lecteurs experts à trouver comme plus similaires une chaîne de lettres cibles et une chaîne de lettre transposée (RZXT-RXZT), qu'une chaîne de lettre cible et une chaîne de lettre substituée (RZXT-RQBT). L'effet TL peut être observé dans des tâches de jugement perceptuel ou de décision lexicale en amorçage masqué. Les données disponibles à l'heure actuelle ne permettent pas de trancher définitivement les questions relatives à l'émergence et la trajectoire développementale des effets TL. Dans ce cadre, la position théorique assumée par Grainger et al. (2016) est que les effets TL peuvent être générés par deux mécanismes distincts. D'une part, un mécanisme visuel appelé bruit de position. D'autre part, un mécanisme spécifique à l'activité de lecture, appelé mécanisme EPI, implémenté par les représentations en bigrammes ouverts. Ce mécanisme devrait conduire à une augmentation de l'effet de transposition au cours de l'apprentissage de lecture et cette augmentation devrait être circonscrite aux chaînes de lettres.



### **1.3. Le mécanisme d'intégration spatiale**

Selon Grainger (2018), le troisième aspect du développement de l'expertise orthographique concerne la capacité de mettre en œuvre les mécanismes EPS et EPI en parallèle à travers plusieurs mots. Ce mécanisme, désigné sous le terme d'**Intégration Spatiale** (IS), permet d'extraire de l'information orthographique de plusieurs mots en même temps en fonction des contraintes visuo-attentionnelles qui s'exercent sur les mécanismes EPS et EPI.

#### ***1.3.1. Paradigme d'étude de l'activité du mécanisme d'intégration spatiale.***

L'activité du mécanisme d'intégration spatiale peut être étudiée à travers une tâche de décision lexicale avec des lettres flanquées (*Flanking Letters Lexical Decision task* en anglais, nommé tâche FLLD ci-après). Cette tâche est inspirée de celles utilisées antérieurement par Eriksen (1995) pour l'étude des processus attentionnels. La version actuelle a été proposée par Dare & Shillcock (2013). Dans cette version, de manière analogue à la tâche de décision lexicale, le participant doit décider le plus rapidement et le plus justement possible si la cible présentée au centre de l'écran est un mot valide. L'intérêt de cette tâche est que la cible est entourée à gauche et à droite par deux flanqueurs de lettres séparées de la cible par un espace (e.g., CH CHAT AT). La suite de caractères est présentée pendant une durée de 150 ms pour empêcher le participant d'effectuer une éventuelle saccade oculaire de la cible vers l'un des flanqueurs. Par exemple, lorsque le participant voit s'afficher à l'écran "CH CHAT AT", il doit indiquer en fixant le centre de l'écran si le mot CHAT est un vrai mot. La procédure expérimentale est illustrée dans la Figure 15.

#### ***1.3.2. Signature empirique de l'activité du mécanisme d'intégration spatiale.***

Le résultat empirique clé obtenu par Dare & Shillcock (2013) dans la tâche de FLLD est que la nature de l'information orthographique contenue dans les flanqueurs influence le temps de décision lexicale sur la chaîne centrale (appelée cible ci-après). Dans leur étude, ces auteurs ont employé trois types de flanqueurs : (1) des flanqueurs non reliés

orthographiquement à la cible (condition non reliée : le rock sh), (2) des flanqueurs reliés orthographiquement à la cible dont l'ordre a été préservé (condition adjacente : ro rock ck) et, (3) des flanqueurs reliés à la cible dont l'ordre n'a pas été préservé (condition inversée : ck rock ro). Les résultats ont révélé que les participants effectuaient plus rapidement leur décision lexicale lorsque les flanqueurs étaient reliés orthographiquement à la cible (condition adjacente et inversée) que lorsque les flanqueurs ne l'étaient pas (condition non reliée). Ce résultat était indépendant de la fréquence lexicale du mot cible. De manière importante, la tâche FLLD permet de simuler l'identification du mot écrit dans des conditions de lecture sans que le participant n'ait à effectuer des saccades oculaires (Snell, Mathôt, et al., 2018). Dans ce cadre, les résultats de Dare et Shillcock (2013) suggèrent que l'information contenue dans les mots parafovéaux (i.e., les flanqueurs) est intégrée en parallèle lors du traitement du mot fovéal (i.e., la cible).

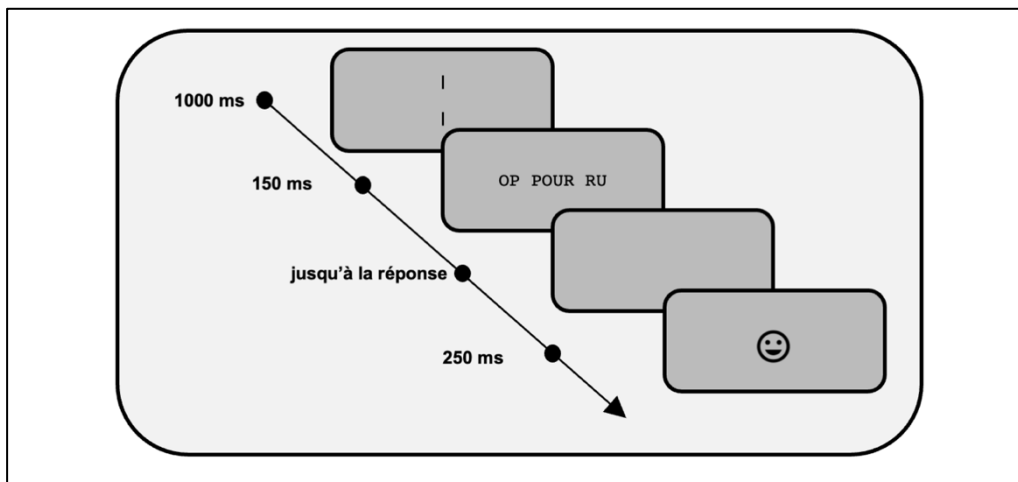


Figure 15. Paradigme de la tâche Flanking letters Lexical Decision (FLLD) de Grainger et al. (2014). Chaque essai commençait par des barres de fixation centrales, suivies d'un stimulus cible présenté brièvement. Le stimulus cible était flanqué de chaque côté par des bigrammes. Le smiley n'était affiché que dans le cas d'une réponse correcte.

### 1.3.3. Caractérisation théorique du mécanisme d'intégration spatiale.

L'un des résultats clés que doit être capable d'expliquer une théorie de l'intégration spatiale est le fait que les conditions adjacentes (ro rock ck) et les conditions inversées (ck rock ro) produisent le même effet facilitateur sur la reconnaissance de la cible "rock". Dans cette perspective, Grainger et al. (2014) proposent d'adapter le modèle à bigrammes ouverts de

Grainger & van Heuven (2003). Cette adaptation conserve l'idée d'un encodage de l'information orthographique par bigrammes ouverts (cf. la section relative au mécanisme EPI, p.48). Ainsi, lorsque le lecteur fixe un mot, l'ensemble des bigrammes du mot fixé sont activés. L'apport de Grainger et al. (2014) est de considérer que les bigrammes des mots adjacents sont également activés et intégrés dans le traitement du mot fovéal dans les limites des contraintes imposées par l'acuité, l'encombrement visuel et l'attention spatiale. Par exemple, la séquence "RO ROCK CK" va à la fois activer les bigrammes du mot fixé (RO, RC, RK, OC, OK, CK) mais également les bigrammes des mots adjacents (RO et CK). L'activité de ces bigrammes est circonscrite à un canal de traitement unique de sorte que les bigrammes du mot fixé et des mots adjacents participent à la sélection d'une unique représentation orthographique (voir Figure 16).

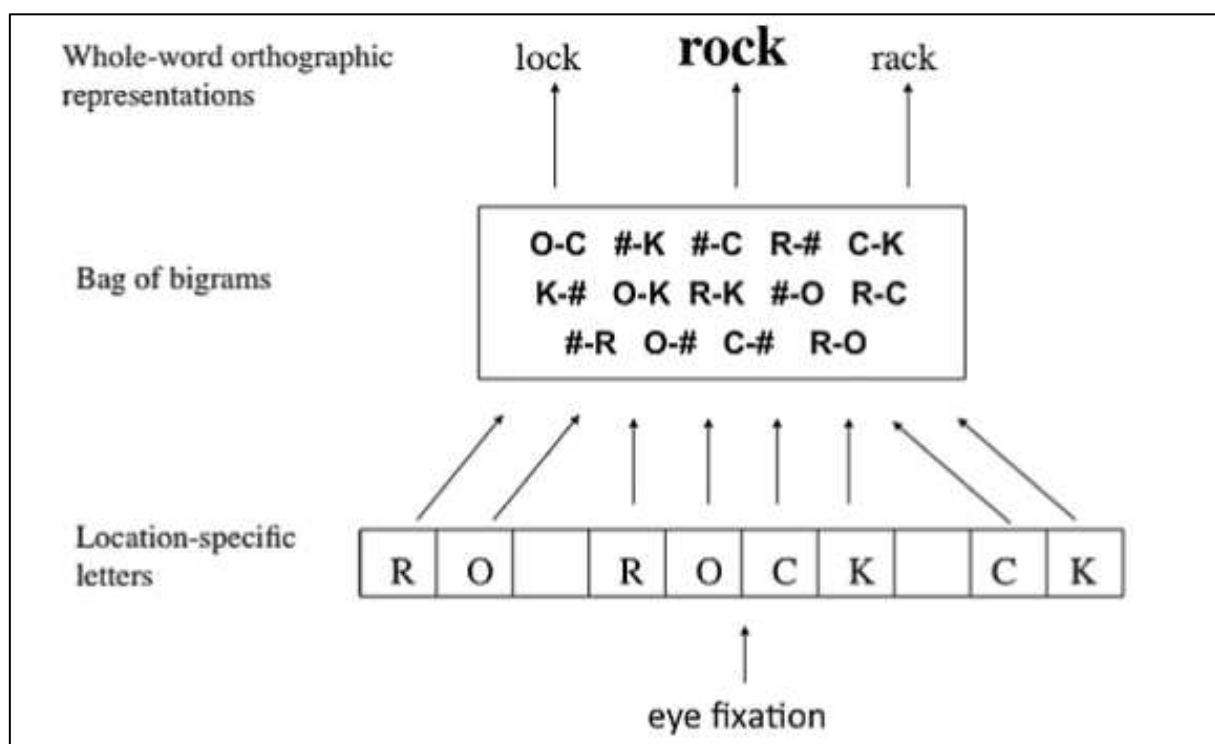


Figure 16. Illustration de l'extension du modèle de Grainger & van Heuven (2003) issue de Grainger et al. (2014)

Afin d'éviter la formation de mots illusoires par la combinaison de lettres provenant de mots différents, le système de codage proposé par Grainger et al. (2014) ne permet pas que les bigrammes soient formés à travers les mots. Par exemple, pour la séquence "RO ROCK CK", le bigramme OR, partagé entre "RO" et "ROCK", ne sera pas encodé. Par ailleurs, Grainger et

al. (2014) proposent d'ajouter un caractère d'espace (représenté par un #) à l'ensemble des 26 caractères alphabétiques utilisés pour encoder les bigrammes. Ce caractère d'espace permet notamment d'encoder l'information orthographique à propos d'une seule lettre, ce qui pourrait s'avérer utile pour encoder les lettres externes servant de point d'ancrage (pour la séquence RO ROCK CK, le bigramme #R est encodé). Enfin, une proposition clé de Grainger et al. (2014) est que si l'ordre des lettres à l'intérieur des bigrammes est crucial (i.e.,  $RO \neq OR$ ), l'ordre des bigrammes n'a pas d'importance (i.e., que RO se trouve à gauche ou à droite de ROCK n'a pas d'importance).

Grainger et al. (2014) ont apporté un support empirique à cette dernière proposition en réalisant une étude répliquant et étendant les résultats de Dare et Shillcock (2013). Une tâche de FLLD a été administrée à des participants normo-lecteurs dans laquelle l'ordre des bigrammes et/ou l'ordre des lettres à l'intérieur des bigrammes était manipulé. Le Tableau 1 illustre les différentes conditions expérimentales.

Tableau 1. Conditions expérimentales utilisées par Grainger et al. (2014). Pour chaque condition expérimentale, le nombre de bigrammes partagés entre la cible et les flanqueurs est indiqué.

| Condition                           | Flanqueur |           | Exemple    | Ensemble de bigrammes activé par les flanqueurs | Nombre de bigrammes partagés avec le mot cible |
|-------------------------------------|-----------|-----------|------------|---|--|
|                                     | Bigramme  | Lettre    |            |   |  |
| <b>B<sub>ID</sub>L<sub>ID</sub></b> | Identique | Identique | ro rock ck | RO, CK  | 2  |
| <b>B<sub>ID</sub>L<sub>IN</sub></b> | Identique | Inversé   | or rock kc | OR, KC  | 0  |
| <b>B<sub>IN</sub>L<sub>ID</sub></b> | Inversé   | Identique | ck rock ro | CK, RO  | 2  |
| <b>B<sub>IN</sub>L<sub>IN</sub></b> | Inversé   | Inversé   | kc rock or | KC, OR  | 0  |
| <b>B<sub>DI</sub>L<sub>DI</sub></b> | Différent |           | st rock ep | ST, EP  | 0  |

Conformément à la proposition décrite ci-dessus, les auteurs ont observé que lorsque l'ordre des lettres dans les bigrammes était préservé (condition **B<sub>ID</sub>L<sub>ID</sub>**, et **B<sub>IN</sub>L<sub>ID</sub>**) le mot cible était plus rapidement identifié que lorsque l'ordre des lettres n'était pas préservé (condition **B<sub>ID</sub>L<sub>IN</sub>**, **B<sub>IN</sub>L<sub>IN</sub>**). Par ailleurs, les auteurs ont observé que l'ordre des bigrammes n'avait pas d'importance : les conditions **B<sub>ID</sub>L<sub>ID</sub>** et **B<sub>IN</sub>L<sub>ID</sub>**, d'une part, et les conditions **B<sub>ID</sub>L<sub>IN</sub>** et **B<sub>IN</sub>L<sub>IN</sub>**, d'autre part, produisaient des effets facilitateurs équivalents pour l'identification du mot cible. Ces résultats peuvent être assez facilement accommodés par le degré de similitude entre les ensembles de bigrammes activés dans chaque condition expérimentale (voir Tableau 1). Ainsi, plus les flanqueurs activeront un ensemble de bigrammes compatibles avec les bigrammes du mot cible, plus l'identification de la cible sera facilitée.

L'hypothèse que l'intégration spatiale des informations parafovéales repose sur l'intégration de représentations orthographiques de type bigrammes ouverts dans un canal unique a été récemment confortée par une étude de Cauchi et al. (2020). Dans cette étude, les auteurs ont cherché à savoir si des flanqueurs reliés phonologiquement pouvaient générer un effet facilitateur sur la reconnaissance du mot cible. Pour ce faire, les auteurs ont utilisé trois conditions expérimentales : (1) une condition orthographiquement reliée et phonologiquement reliée (O+P+ : "roze rose roze"), (2) une condition orthographiquement reliée et phonologiquement non reliée (O+P- : "rone rose rone" et, (3) une condition non reliée orthographiquement et phonologiquement (O-P- : "fuli rose fuli"). Le résultat clé de cette étude était qu'aucune différence significative n'a été observée entre les deux conditions orthographiquement reliées (O+P+ et O+P-). En d'autres termes, le fait que les flanqueurs étaient reliés phonologiquement (O+P+) n'apportait aucun effet facilitateur supplémentaire sur le traitement du mot cible. Le fait que l'information phonologique n'ait pas été intégrée spatialement est selon les auteurs dû à la nature de l'encodage de l'information orthographique qui sous-tend le processus d'intégration. En effet, les représentations en bigrammes ouverts,

qui encodent l'identité et la position des lettres de manière flexible, ne conviennent pas à l'encodage de l'information phonologique qui nécessite un encodage précis de l'identité et de la position des lettres (voir Grainger et al., 2016; Grainger & Ziegler, 2011). Ainsi, l'absence d'effet facilitateur des flanqueurs orthographiquement et phonologiquement relié (O+P+) est conforme avec l'idée que les représentations sous-lexicales sous-tendant l'encodage de l'information orthographique lors du processus d'intégration spatiale sont du type bigrammes ouverts.

Au cours des dernières années, l'emploi de la tâche FLLD s'est développé pour tenter de déterminer jusqu'à quel niveau de traitement pouvait être intégrée l'information orthographique extraite des flanqueurs. Ces études ont mis en évidence que les flanqueurs syntaxiquement (Snell, Meeter, et al., 2017), morphologiquement (Grainger et al., 2021), et sémantiquement reliés (Snell, Declerck, et al., 2017) permettaient de faciliter le traitement du mot cible. Ainsi le traitement des informations intégrées spatialement ne serait pas circonscrit au niveau orthographique. Ces observations sont similaires à celles obtenues dans d'autres paradigmes d'étude du traitement en parallèle des mots écrits : le paradigme de présentation visuelle parallèle rapide (Snell & Grainger, 2017) et la tâche de décision grammaticale (Mirault et al., 2018; Mirault & Grainger, 2020a; Snell & Grainger, 2019 pour un résumé des résultats empiriques). En somme, ces données suggèrent que les lecteurs experts sont capables de traiter plusieurs mots en parallèle au-delà du niveau sous-lexical, permettant ainsi l'intégration spatiale d'information de haut niveau.

### *1.3.4. Développement du mécanisme d'intégration spatiale au cours de l'apprentissage de la lecture.*

#### **1.3.4.1. Les prérequis au développement du mécanisme d'Intégration Spatiale**

Le développement du mécanisme d'intégration spatiale au cours de l'apprentissage de la lecture serait soumis à (1) la capacité à automatiser les processus d'identification du mot écrit et (2) la capacité à avoir un empan perceptif suffisamment large pour traiter les informations parafovéales. Ces deux capacités devraient conditionner l'observation d'effets d'intégration spatiale de l'information orthographique chez l'apprenti lecteur.

D'une part, les résultats de Duñabeitia et al. (2015) suggèrent que le développement du mécanisme EPI, accompagnant l'automatisation de l'identification du mot écrit, s'effectuerait relativement rapidement une fois que l'enfant a commencé à être exposé à l'écrit. Pour rappel, ces auteurs ont montré que les enfants de CP devenaient sensibles aux effets de transpositions de lettres qui constituent la signature empirique de l'activité du mécanisme EPI. Cette observation est corroborée par les résultats de Lété et Fayol (2013) qui ont mis en évidence des effets de transpositions chez les enfants de CP dans une tâche de décision lexicale en amorçage masqué. La capacité à mettre en œuvre le mécanisme EPI et à encoder des représentations de type bigramme ouvert, nécessaire à la mise en œuvre du mécanisme d'intégration spatiale, se mettrait donc en place relativement tôt au cours de l'apprentissage de la lecture.

D'autre part, pour que l'intégration spatiale puisse opérer, les lettres situées en parafovéa doivent pouvoir être perçues par le lecteur. Le nombre de lettres que le lecteur peut percevoir de part et d'autre du point de fixation est appelé empan perceptif. Cet empan perceptif peut être évalué à l'aide du paradigme de la fenêtre mobile (McConkie & Rayner, 1975). En utilisant ce paradigme, Rayner (1986) a montré que la taille de l'empan perceptif était relativement stable au début de l'apprentissage de la lecture avant d'augmenter plus tardivement : l'empan était de

11 caractères pour les enfants de 2<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> année alors qu'il était de 14 caractères pour les enfants de 6<sup>ème</sup> année. Selon des données concordantes, l'augmentation de la taille de l'empan perceptif serait sous-tendue par l'amélioration des capacités d'identification du mot écrit (Blythe & Joseph, 2011; McConkie et al., 1991; Sperlich et al., 2015). Par exemple, Sperlich et al. (2016) ont suivi longitudinalement des enfants de la première à la troisième année et ont mis en évidence que les performances dans l'identification des mots écrits au T1 permettaient de prédire significativement la taille de l'empan perceptif au T2. L'ensemble de ces données suggèrent donc une amélioration quantitative de l'empan perceptif au cours de l'apprentissage de la lecture, c'est-à-dire un accroissement du nombre de lettres perçues.

Si l'empan perceptif augmente de manière quantitative, une augmentation de nature qualitative est également attendue. Cette notion qualitative doit s'entendre au sens où l'ensemble des lettres situées dans l'empan perceptif ne bénéficient pas de la même profondeur de traitement. Par exemple, Rayner (1986) proposait que plus les lettres étaient proches de la zone fovéale, plus elles bénéficiaient d'un traitement profond. En effet, comme le décrit Häikiö et al. (2009), l'empan perceptif peut-être divisé en trois zones sur la base du type d'information traitée : l'information sur l'identité des lettres, l'information sur les traits des lettres et l'information sur la longueur des mots. L'information sur l'identité des lettres correspond à la capacité à identifier une lettre spécifique (e.g., "a" et "A" correspondent à la lettre A). Cette information ne peut être extraite que pour les lettres se trouvant à proximité de la zone fovéale. L'information sur les traits des lettres correspond à la capacité à extraire les traits distinctifs des lettres. Par exemple, distinguer "c" et "o" car elles partagent la même forme globale du fait de leur rondeur, ou encore les lettres "d" et "b" qui partagent la forme ascendante de leur hampe. Ces informations sur les traits de lettres peuvent être extraites à des excentricités plus importantes que les informations sur l'identité des lettres. Enfin, les lettres les plus éloignées de la zone fovéale permettent d'extraire des informations sur la longueur des mots. Un résultat



intéressant mis en évidence par Häikiö et al. (2009) est que si l'empan perceptif lié à chacun de ces trois traitements augmente avec l'expertise en lecture, l'empan de traitement de l'identité des lettres est celui qui présentait l'augmentation la plus graduelle : 5 lettres en 2<sup>ème</sup> année, 7 lettres en 4<sup>ème</sup> année et 9 lettres en 6<sup>ème</sup> année. Ainsi, si le traitement des informations peu profondes au sein de l'empan perceptif semble être déjà bien présent au début de l'apprentissage de la lecture (stable à 11 lettres entre la 2<sup>ème</sup> et la 4<sup>ème</sup> année, voir Rayner, 1986), la mise en place de traitements plus profonds tel que le traitement de l'identité des lettres requiert plusieurs années (de 5 lettres en 2<sup>ème</sup> année à 9 lettres en 6<sup>ème</sup> année, voir Häikiö et al., 2009). Ces résultats sont corroborés par les études de Khelifi et al. (2015, 2017) montrant des améliorations qualitatives dans le traitement d'amorces parafovéales entre des enfants de 3<sup>ème</sup> et de 5<sup>ème</sup> année.

En résumé, ces données suggèrent que les apprentis lecteurs pourraient être capables d'intégrer spatialement de l'information orthographique précocement. En effet, ces derniers présentent (1) la capacité à encoder des représentations sous lexicales de type bigrammes ouverts et, (2) la capacité à avoir un empan perceptif suffisamment large pour traiter les informations parafovéales. Toutefois, la capacité à mettre en œuvre l'intégration spatiale demeure hypothétique. Bien que l'empan perceptif des apprentis lecteurs soit suffisamment large pour traiter les informations contenues dans les flaqueurs de la tâche FLLD (11 caractères en 2<sup>ème</sup> année), la nature du traitement opéré sur ces flaqueurs pourrait être insuffisante pour générer l'effet d'intégration spatiale. En effet, l'intégration spatiale de l'information orthographique requiert d'identifier l'identité des lettres, or l'empan de traitement de l'identité de lettres est considérablement réduit chez l'apprenti lecteur (5 lettres en 2<sup>ème</sup> année). De ce fait, la capacité à intégrer spatialement l'information orthographique pourrait être réduite ou inexistante chez les plus jeunes lecteurs. Ce n'est qu'une fois que les capacités d'identification des mots écrits et que l'empan de traitement de l'identité des lettres se seront développés, qu'une sensibilité accrue à l'intégration spatiale devrait être observée.

#### **1.3.4.2. Étude du mécanisme d'intégration spatiale au cours de l'apprentissage de la lecture.**

À l'heure actuelle, peu d'étude se sont intéressées au développement du mécanisme d'intégration spatiale au cours de l'apprentissage la lecture. Une première étude de Snell et al., (2021) a exploré la trajectoire développementale de l'effet d'intégration spatiale pour des flanqueurs reliés orthographiquement chez des enfants de la 1<sup>ère</sup> année à la 6<sup>ème</sup> année. Ces flanqueurs pouvaient être soit des bigrammes (e.g, condition reliée : ro rock ck ; condition non-reliée : st rock ep) soit des mots (e.g., condition reliée : rock rock rock ; condition non-reliée : step rock step). Les résultats ont révélé que, quels que soient le niveau de lecture et le type de flanqueur (bigramme ou mot), les enfants présentaient un effet d'intégration spatiale avec des temps de réaction plus rapide lorsque les flanqueurs était reliés orthographiquement à la cible que lorsqu'ils ne l'étaient pas.

De manière intéressante, l'amplitude de cet effet n'était pas modulée par le niveau de lecture. Dans les conditions où les flanqueurs étaient des bigrammes, ce résultat peut s'expliquer par le fait que les lettres les plus excentrées se situaient dans l'empan de traitement de l'identité des lettres des lecteurs les plus jeunes (jusqu'à 5 lettres du point de fixation : ro rock ck). En revanche, ce raisonnement semble incompatible avec la condition où les flanqueurs étaient des mots. Dans cette situation, les lettres les plus excentrées excédaient l'empan de traitement de l'identité des lettres. En effet, pour pouvoir traiter les flanqueurs "mots", un empan de 7 lettres était nécessaire (e.g., rock rock rock). Toutefois, les valeurs de références de l'empan de traitement de l'identité des lettres proposée par Häikiö et al. (2009) ont été obtenues sur du matériel finnois qui contenait des mots plus longs et moins fréquents que ceux utilisés par Snell et al. (2021). Le fait d'utiliser des mots plus longs et moins fréquents génère des contraintes supplémentaires sur le processus d'identification du mot écrit. Ces contraintes peuvent avoir pour conséquence de réduire et de concentrer le déploiement de l'attention vers la zone fovéale. Ainsi, l'estimation de l'empan de traitement de l'identité des lettres fournie par Häikiö et al.

(2009) peut être sous-estimée. À l'inverse, lorsque les mots sont courts et fréquents, l'identification est facilitée et l'attention peut être déployée au-delà de la zone fovéale. Ce raisonnement, permettrait d'expliquer l'équivalence de l'effet des flanqueurs entre les conditions "bigrammes" et "mots" reliés orthographiquement de la 1<sup>ère</sup> à la 6<sup>ème</sup> année du primaire. Toujours selon ce raisonnement, l'utilisation de mots cibles plus longs et moins fréquents, pourrait augmenter les contraintes sur les processus d'identification du mot cible et rendre plus difficile l'intégration spatiale des flanqueurs chez les plus jeunes lecteurs. Cette interprétation n'a toutefois pas été testée empiriquement par les auteurs.

Par ailleurs, si les apprentis lecteurs semblent être capables d'intégrer spatialement l'information orthographique assez tôt au cours de l'apprentissage de la lecture, la question de savoir jusqu'à quel niveau de traitement cette information est intégrée subsiste. En effet, si tous les apprentis lecteurs semblent être capables d'extraire l'identité des lettres parafovéales, l'usage qu'ils font de cette information pour accéder à des informations de plus haut niveau (e.g., syntaxique, morphologique, sémantique, etc.) pourrait être source de disparité en fonction de l'efficience en lecture. Dans cette perspective, Cauchi et al. (2022) ont cherché à savoir comment se développait l'intégration spatiale d'information morphologique au cours de l'apprentissage de la lecture. Les résultats de cette étude ont révélé que seuls les adultes étaient capables de tirer un bénéfice de flanqueurs reliés morphologiquement (e.g., danse danseur danse), alors que les enfants de 3<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> année en étaient incapables. Les auteurs en ont conclu que l'intégration spatiale d'information morphologique nécessitait plusieurs années d'apprentissage pour être effective.

L'ensemble de ces résultats suggèrent que les apprentis lecteurs sont rapidement capables d'intégrer spatialement de l'information orthographique sous réserve que celle-ci se trouve dans les limites de l'empan de traitement de l'identité des lettres. En revanche, la capacité

d'intégrer ces informations orthographiques à des niveaux de traitement plus avancés pourrait nécessiter plusieurs années d'apprentissage.

### *1.3.5. Synthèse*

Dans le cadre de l'architecture du traitement orthographique de Grainger et al. (2016), le mécanisme d'intégration spatiale permet d'encoder en parallèle l'information orthographique extraite de plusieurs mots. Pour que ce mécanisme puisse se mettre en place chez l'apprenti lecteur, deux conditions doivent être réunies :

- 1) L'apprenti lecteur doit avoir commencé à automatiser les processus d'identification du mot écrit.
- 2) L'apprenti lecteur doit avoir un empan perceptif suffisamment large lui permettant de traiter les informations parafovéales.

Les données disponibles suggèrent que dans des conditions de traitement peu coûteuse (i.e., mot courts et fréquents), les apprentis lecteurs sont capables de mettre en œuvre le mécanisme d'intégration spatiale. Toutefois, la résistance de ce mécanisme à des conditions de traitement plus coûteuse (e.g., mots longs, mots rares, profondeur de traitement, etc.) lors de l'apprentissage de la lecture devra être investiguée par des études ultérieures. À cette fin, l'activité du mécanisme d'intégration spatiale peut-être étudiée à l'aide du paradigme FLLD dans lequel l'effet facilitateur des flaqueurs sur le traitement du mot cible témoigne de l'intégration spatiale.

## 1.4.L'hypothèse de la coévolution orthographique

### *1.4.1. Rappel et contextualisation de l'hypothèse de la coévolution des mécanismes orthographique.*

Comme indiqué en conclusion de la partie introductive, l'objectif de cette thèse est de caractériser théoriquement et empiriquement la coévolution des mécanismes EPS, EPI et IS au cours de l'apprentissage de la lecture. L'ambition des deux premiers chapitres est d'inscrire cette caractérisation dans le cadre du modèle de Grainger et al. (2016). Ce modèle permet d'opérationnaliser les marqueurs comportementaux et les paradigmes d'études associés à chacun des mécanismes orthographiques considérés. Ainsi, les sections 1.1, 1.2 et 1.3 ont permis de définir les opérationnalisations suivantes :

- i. **Le mécanisme EPS** sera étudié à l'aide de la tâche d'identification de cible dans une chaîne (*Target-in-String Identification task*, ci-après TSI). Celle-ci permet de mettre en évidence la fonction de position sérielle en W pour les chaînes de lettres, caractérisée par un net avantage pour le report de la lettre à la première position.
- ii. **Le mécanisme EPI** sera étudié à l'aide de la tâche de jugement perceptuel (*Same-Different Matching task*, ci-après SDM). Celle-ci permet de mettre en évidence des effets de transposition plus importants pour les chaînes de lettres que pour les chaînes de chiffres ou de symboles.
- iii. **Le mécanisme IS** sera étudié à l'aide de la tâche de décision lexicale à lettre flanquées (*Flanking Letters Lexical Decision task*, ci-après FLLD). Celle-ci permet de mettre en évidence des effets d'intégration spatiale caractérisés par une facilitation des flanqueurs reliés orthographiquement par rapport à des flanqueurs non-reliés sur le temps de décision lexicale.

### ***1.4.2. Choix du design expérimental pour l'étude de l'hypothèse de la coévolution des mécanismes orthographiques***

Le projet de thèse rédigé en 2019 proposait de s'appuyer sur les opérationnalisations décrites ci-dessus pour mesurer l'évolution des marqueurs comportementaux de chaque mécanisme orthographique lors de l'apprentissage de la lecture. Dans ce cadre, le projet de thèse prévoyait de tester chaque enfant dans les trois tâches orthographiques à plusieurs reprises au cours de leur apprentissage de la lecture. Ce design expérimental a récemment été utilisé par Fernández-López et al. (2021) pour étudier l'émergence des mécanismes EPS et EPI chez l'adulte normo-lecteur lors de l'apprentissage d'un script artificiel. La présentation de cette étude servira à illustrer le design expérimental envisagé dans le projet initial de thèse.

#### **1.4.2.1. Design expérimental utilisé par Fernández-López et al. (2021)**

L'étude de Fernández-López et al. (2021) visait à étudier le développement des mécanismes EPS et EPI chez l'adulte normo-lecteur lors de l'apprentissage d'un script artificiel. Pendant six jours, à raison d'une séance d'entraînement par jour, les participants étaient confrontés à deux scripts artificiels. Pour le premier script, appelé script d'entraînement, les participants devaient apprendre les Conversions Graphèmes-Phonèmes (CGP) qui transcrivaient des relations entre les formes graphiques et sonores du nouveau script. Au fil des jours, les participants apprenaient à lire à haute voix et à écrire des chaînes de caractères. L'apprentissage de ce script visait à simuler une situation d'apprentissage de la lecture. Pour le second script, appelé script contrôle, les participants étaient familiarisés visuellement avec les caractères mais n'apprenaient pas à les associer à des formes sonores. Au cours des sessions d'entraînement, les participants se contentaient d'effectuer des tâches de comptage et détection. L'apprentissage de ce second script visait à contrôler les effets liés à la familiarité visuelle (voir par exemple les arguments relatifs au mécanisme de bruit de position, p.47). Les auteurs ont cherché à valider l'hypothèse que le développement des mécanismes EPS et EPI devrait être

spécifique aux caractères du script d'entraînement qui simule l'apprentissage d'un système d'écriture.

Une session de pré-tests était organisée le premier jour et une session de post-tests le dernier jour, à l'issue de l'entraînement pour la réalisation des tâches TSI et SDM destinées à évaluer, respectivement, les mécanismes EPS et EPI. Dans la tâche TSI, les auteurs s'attendaient à observer une amélioration du taux de précision du report du premier caractère plus importante pour le script d'entraînement. Cette signature empirique témoignerait du développement de détecteur de caractères centrés sur le regard pour les caractères du script d'entraînement. Dans la tâche SDM, les auteurs s'attendaient à observer un effet de transposition de lettres plus important pour les caractères du script d'entraînement. Cette signature empirique témoignerait du développement de représentation de type bigrammes ouverts pour les caractères du script d'entraînement. La Figure 17.C illustre ces prédictions.

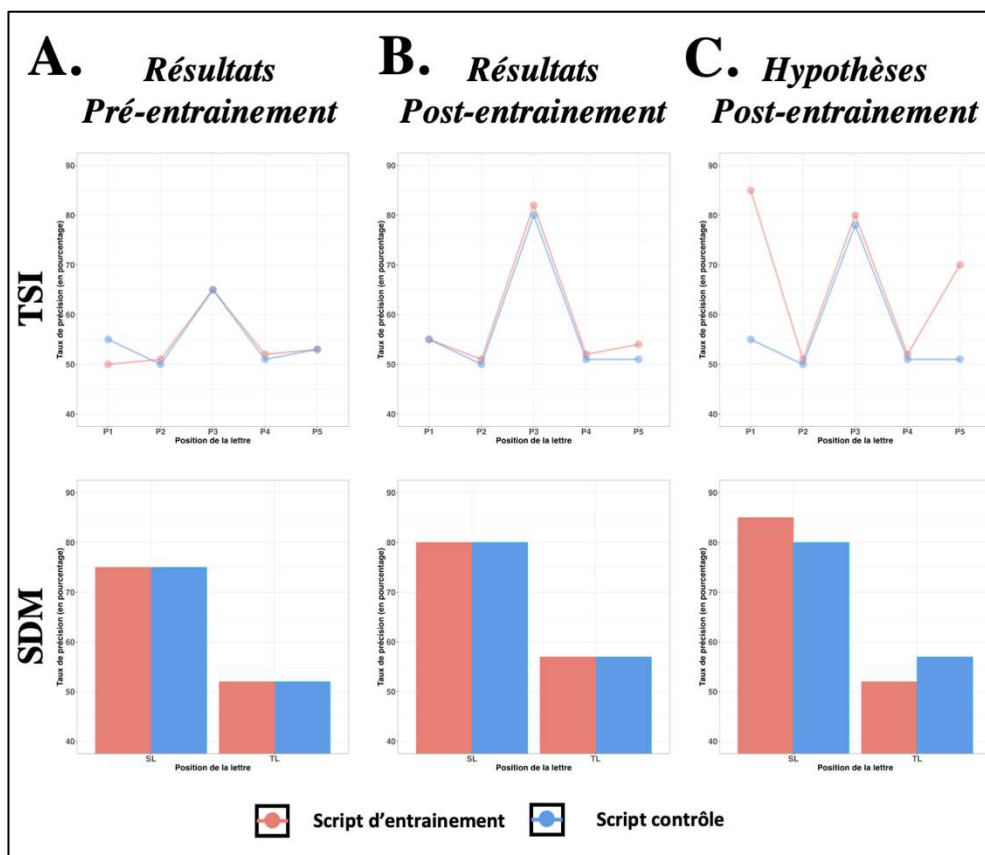


Figure 17. Illustration des résultats obtenus par Fernández-López et al. (2021) avant les sessions d'entraînement (A) et après les sessions d'entraînement (B) pour les tâches SDM et TSI. Les graphiques à droite (C) illustrent les résultats attendus par les hypothèses des auteurs.

La Figure 17.A illustre les fonctions sérielles de position obtenues dans la tâche TSI pour les deux scripts artificiels. Ces fonctions sont similaires pour les deux scripts avec un avantage important pour la position centrale. Un faible avantage pour le report de la première position est également observé ; celui-ci ne diffère pas entre les deux scripts artificiels. Ce résultat suggère que l'entraînement réalisé sur les CGP n'a pas été suffisant pour développer un mécanisme EPS spécifique au traitement des caractères du script d'entraînement.

La Figure 17.B illustre les taux de précisions obtenus dans les conditions "lettres transposées" (TL) et "lettres substituées" (SL) de la tâche SDM pour les deux scripts artificiels. Les analyses révèlent que l'amplitude de l'effet de transposition (TL-SL) ne diffère pas significativement entre le script contrôle et le script d'entraînement. À l'instar des observations réalisées dans la tâche TSI, ce résultat suggère que l'entraînement réalisé sur les CGP n'a pas été suffisant pour développer un mécanisme EPI spécifique au traitement des caractères du script d'entraînement. Les auteurs concluent que l'acquisition de l'expertise orthographique, caractérisée par la mise en place des mécanismes EPS et EPI, nécessite une période d'apprentissage plus longue.

#### **1.4.2.2. Design expérimental envisagé dans la présente thèse**

Fernández-López et al. (2021) reconnaissent que la durée d'entraînement utilisée pour explorer l'émergence des mécanismes EPS et EPI était trop courte et proposent de répliquer leur étude en utilisant une période d'entraînement plus longue. Les auteurs envisagent également de mener une vaste étude longitudinale visant à évaluer les performances orthographiques avant et après avoir appris à lire. C'est cette dernière proposition qui était au cœur de notre projet initial de thèse, dont la conceptualisation est illustrée dans la Figure 18. À l'instar de l'étude de Fernández-López et al. (2021), mais pour l'apprentissage du français cette fois-ci, l'objectif était d'évaluer des enfants apprentis lecteurs à plusieurs reprises pour chaque mécanisme orthographique étudié. Au total, huit sessions de tests, s'étalant de la fin de l'année de Grande



Section Maternelle jusqu'à la fin du CP, avaient été envisagées. Lors de chaque session, en plus de réaliser les tâches TSI et SDM, les enfants devaient réaliser la tâche FLLD afin d'évaluer le mécanisme d'intégration spatiale. Du fait des restrictions sanitaires cette étude longitudinale n'a néanmoins pas pu être réalisée.

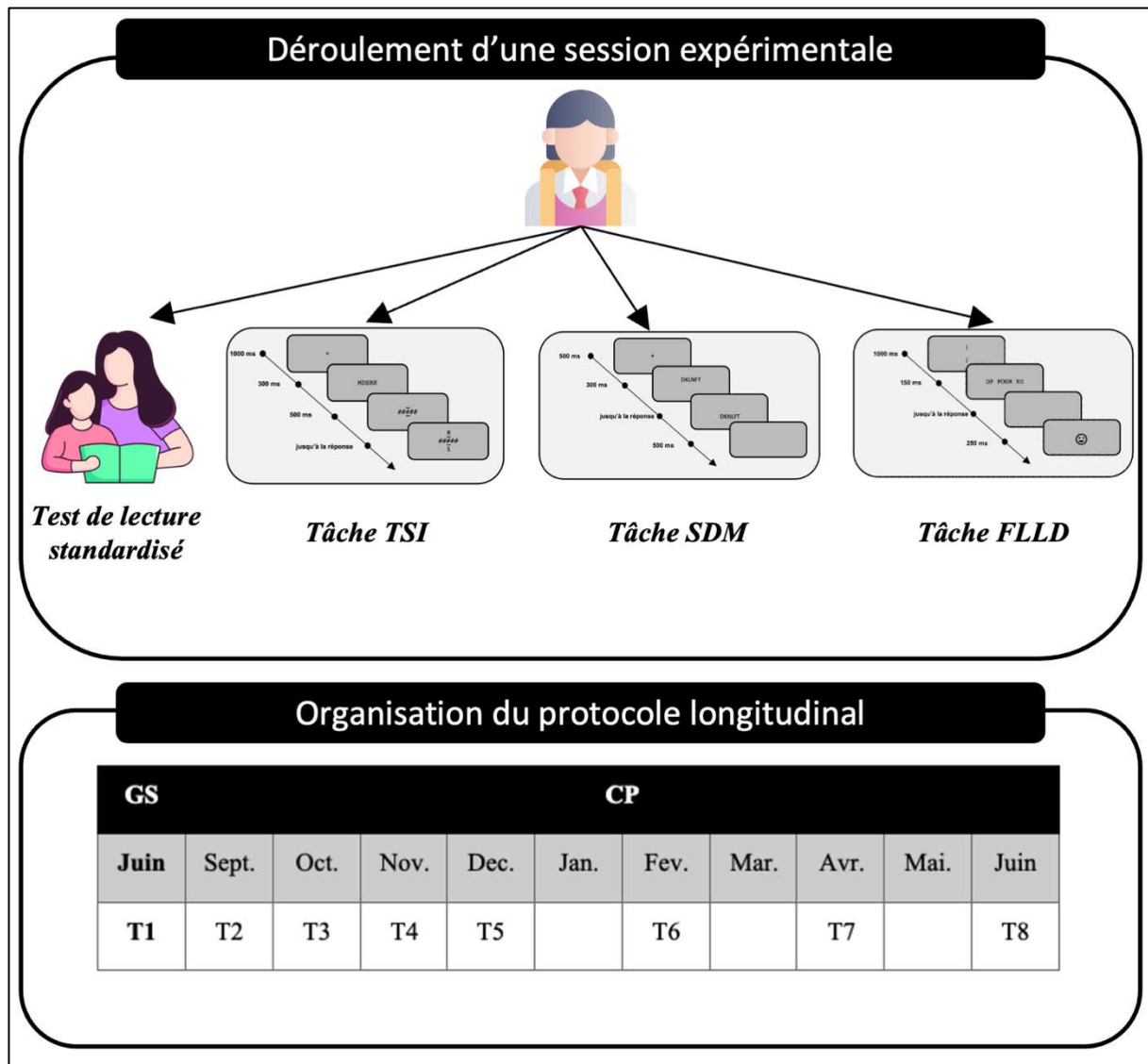


Figure 18. Illustration du protocole longitudinal envisagé dans le projet de thèse initial.

### 1.4.3. Formulation d'hypothèses relatives à la coévolution des mécanismes orthographiques.

Si le design expérimental de Fernandes-Lopez et al. (2021), initialement envisagé dans notre projet de thèse, permet de concevoir des relations d'interdépendances entre les

mécanismes EPS et EPI, cette question n'est à aucun moment traitée par les auteurs. Au contraire, les auteurs semblent évacuer cette question en formulant les hypothèses relatives à l'émergence et au développement de ces mécanismes de manière totalement indépendante. Afin de pallier ce manque, la suite de cette section visera à formaliser :

- 1) les hypothèses relatives à l'émergence des mécanismes orthographiques au cours de l'apprentissage de la lecture ;
- 2) les hypothèses relatives à la spécialisation des mécanismes orthographiques de l'apprentissage de la lecture.

#### **1.4.3.1. Formalisation des hypothèses relatives à l'émergence et à la spécialisation des mécanismes orthographiques au cours de l'apprentissage de la lecture**

##### ***1.4.3.1.1. Rappel des données empiriques***

**Mécanisme d'Encodage Position-Spécifique.** Bien qu'aucune donnée longitudinale ne soit disponible pour ce mécanisme, plusieurs études transversales ont exploré la trajectoire développementale de l'effet d'avantage de la première lettre (voir la section sur le mécanisme EPS, p.32). À ce titre, l'étude de Grainger, Bertrand, et al. (2016) présente un intérêt particulier puisqu'elle fournit des données sur l'évolution du taux de précision pour le report du premier caractère (lettre vs. symbole) d'une chaîne de caractère dans la tâche TSI. Ainsi, la lecture de la Figure 2 de cette étude indique que la précision pour le report du premier caractère ne diffère pas entre les chiffres et les lettres (environ 55%) chez les enfants ayant un score de lecture équivalent à celui attendu à la fin du CP. En revanche, dès que les enfants atteignent le score de lecture attendu en milieu de CE1, la précision pour le report du premier caractère est plus élevée pour les lettres (environ 62.5%) que pour les symboles (stable à 55%). Ces résultats indiquent qu'en moyenne, le mécanisme EPS émerge entre la fin de la première d'apprentissage et le milieu de la seconde. Toutefois, compte tenu de l'hétérogénéité des niveaux de lecture

(Lubineau et al., 2021), il est tout à fait plausible que le mécanisme EPS émerge dès la première année d'étude chez les lecteurs les plus performants.

**Mécanisme d'Encodage Position-Invariant.** Actuellement, seule l'étude longitudinale de Duñabeitia et al. (2015) a exploré l'émergence de l'effet de transposition de lettres chez l'apprenti lecteur. Malgré ses limites méthodologiques (voir la section sur le mécanisme EPI, p.44), cette étude semble indiquer que le mécanisme EPI est opérationnel dès la fin de la première année d'apprentissage<sup>9</sup>. Ainsi le mécanisme EPI émergerait dans une fenêtre temporelle relativement proche de celle déterminée pour le mécanisme EPS.

**Mécanisme d'Intégration Spatiale.** Actuellement, seule l'étude transversale de Snell et al. (2021) a exploré l'émergence de l'effet d'intégration spatiale. Les résultats de cette étude indiquent que le mécanisme IS serait déjà opérationnel pour les mots courts et fréquents dès la fin de la première année d'apprentissage. Encore une fois, le mécanisme IS émergerait dans une période qui se superposerait à celle des mécanismes EPS et EPI.

#### ***1.4.3.1.2. Formulation des hypothèses***

Les résultats rappelés ci-dessus mettent en évidence que la période relative à l'observation de l'émergence<sup>10</sup> des mécanismes orthographiques semble être limitée aux premiers mois de l'apprentissage de la lecture. Ces résultats semblent également suggérer que l'émergence de ces mécanismes se recouvre, ce qui impliquerait qu'il ne serait pas possible d'identifier des phases développementales distinctes pour chacun d'entre eux. Toutefois, cette conclusion doit être formulée avec précaution, car ces études n'effectuent qu'une seule mesure à la fin de chaque année d'apprentissage. Ce choix méthodologique est en partie motivé par le fait que les enfants de première année montrent beaucoup de difficultés pour réaliser des tâches

---

<sup>9</sup> Il doit être noté que cette émergence a parfois été observé plus tardivement, entre la 3<sup>ème</sup> et la 5<sup>ème</sup> année d'apprentissage, dans des tâches d'amorçage masqué (Lété & Fayol, 2013).

<sup>10</sup> Le lecteur notera que le terme "émergence" est utilisée de manière interchangeable avec "mise en place".

expérimentales destinées à l'origine à des adultes. Pour pouvoir être réalisées correctement, ces tâches nécessitent d'avoir développé des processus orthographiques rudimentaires. La réalisation de ces points de mesure intervient donc à un moment non adapté pour déterminer le moment de l'émergence desdits mécanismes. Afin d'éviter cet écueil, la réalisation de plusieurs points de mesures au cours de la première, voire de la deuxième année d'apprentissage serait plus adapté. Cela rejoint la proposition formulée dans le projet initial de thèse (voir Figure 18; Étude non réalisée pour cause de restrictions sanitaires). Pour réaliser ces mesures, une adaptation des paradigmes expérimentaux devant permettre aux enfants pré-lecteurs de réussir les tâches proposées est nécessaire (voir Étude n°1, p.83). Différentes phases développementales sous-tendant la mise en place de l'architecture orthographique de Grainger, Dufau, et al. (2016) pourraient alors être observées.

Sur la base des propositions théoriques antérieures, quatre phases développementales devraient pouvoir être identifiées. Au cours de la première phase, en accord avec la plupart des modèles de l'acquisition de la lecture, l'enfant utilise une stratégie d'identification lente et sérielle qui réside dans l'application de la procédure de décodage phonologique. Le marqueur comportemental associé à cette phase est l'effet pseudo-homophone. L'effet pseudo-homophone se caractérise par le fait que l'apprenti lecteur a tendance à souvent identifier à tort comme un vrai mot, un pseudo-mot dont la conversion grapho-phonémique est valide (e.g., dire que "roze" est un vrai mot). Cet effet, pouvant être mesuré dans une large variété de tâches, devrait être très élevé lors de cette première phase (voir Étude 6, p.206). Lors d'une seconde phase, l'enfant devrait commencer à développer des détecteurs de lettres centrés sur le regard (DLCR, associé au mécanisme EPS) afin de rendre opérationnel le traitement en parallèle des lettres. Le marqueur comportemental associé à cette seconde phase est l'émergence de la fonction de position sérielle en W, et tout particulièrement l'émergence d'un avantage pour le report de la première lettre dans la tâche TSI. Dans une troisième phase, le développement des DLCR, ainsi

que l'instanciation croissante de nouvelles représentations orthographiques par la procédure de décodage phonologique, devraient permettre l'émergence des mécanismes EPI et IS. Le fait que l'émergence du mécanisme EPI est précédée par celle du mécanisme EPS est une proposition formulée explicitement par Grainger, Lété, et al. (2012). De plus, comme indiqué dans la section dédiée au mécanisme IS (p.58), la possibilité d'intégrer de l'information orthographique à travers plusieurs mots est conditionnée au fait que les mécanismes EPS et EPI soient opérationnels. Ainsi, sous réserve que l'empan perceptuel des enfants soit suffisamment large, l'émergence du mécanisme IS devrait se superposer à celle du mécanisme EPI. Dans cette phase, des effets de transposition de lettres et d'intégration spatiale devraient émerger. Par ailleurs, dans les phases 2 et 3, l'apprenti lecteur est dans une phase de construction de l'interface orthographique qui n'est par conséquent pas encore totalement opérationnelle. De ce fait, l'apprenti lecteur continue d'utiliser la procédure de décodage phonologique qui va progressivement être abandonnée, diminuant l'amplitude de l'effet pseudo-homophone. Ce n'est que dans une quatrième phase, celle de l'expertise orthographique, que le lecteur abandonnera la procédure de décodage phonologique au profit d'un traitement orthographique automatisé et parallèle. Dans cette phase, les marqueurs comportementaux associés à chaque mécanisme orthographique devraient être saillants. Les effets pseudo-homophones devraient être quant à eux considérablement réduits.

Le début des trois premières phases interviendrait dans une période circonscrite aux premiers mois de l'apprentissage de la lecture. Les contours du début de la dernière phase sont plus flous dans la mesure où il n'existe pas de marqueur comportemental particulier la caractérisant. De manière générale, il n'existe pas de consensus pour définir précisément ce que constitue l'expertise orthographique, les performances réalisées dans les tâches évaluant les processus orthographiques étant généralement sujettes à de large différences inter-individuelles. Toutefois, la littérature s'accorde sur le fait que ces processus nécessitent de

longues années avant d'être totalement automatisés. Le début de la phase 4 devrait donc être considérablement différé par rapport au début de la phase 1, contrairement au début des phase 2 et 3 qui devraient en être très proche. Enfin, il convient de noter que le début de chacune des phases est potentiellement conditionné à des variabilités inter-individuelles. La manière dont ces variabilités inter-individuelles impactent le début de chaque phase ne fait pas l'objet de la présente thèse. En effet, ces variabilités peuvent être de nature variée et un examen spécifique de chacune d'entre elle serait nécessaire. La Figure 20 résume les hypothèses relatives à la mise en place coordonnées des mécanismes orthographiques au cours de la lecture.

| Phase<br>développementale | Stratégie de<br>lecture  |                   |                              |     | Échelle<br>Temporelle   |
|---------------------------|--------------------------|-------------------|------------------------------|-----|---|
|                           | Décodage<br>phonologique |                   | Traitement<br>orthographique |     |   |
|                           | PSH                      | 1 <sup>st</sup> L | TL                           | FLK |   |
| Phase n°1                 | +++                      | ×                 | ×                            | ×   | Début de<br>l'apprentissage<br>T1<br>T2<br>T3<br>1ère année d'apprentissage |
| Phase n°2                 | +++                      | +                 | ×                            | ×   |   |
| Phase n°3                 | ++                       | ++                | +                            | +   |   |
| Phase n°4                 | +                        | +++               | +++                          | +++ |   |

Figure 20. Représentation schématique des phases développementales liées à l'émergence des processus orthographiques au cours de l'apprentissage de la lecture. Le recours à la stratégie de décodage phonologique peut-être mesurée à l'aide de l'effet pseudo homophone (PSH) dont l'amplitude devrait diminuer au cours de l'apprentissage de la lecture. Le recours à la stratégie de traitement orthographique devrait se matérialiser par la mise en place des mécanismes EPS, EPI et IS qui devraient respectivement être évalués par l'effet d'avantage de la première lettre (1st L), de l'effet de transposition de lettres (TL) et l'effet d'intégration spatiale des flanqueurs reliés (FLK). L'amplitude de ces effets devraient progressivement augmenter au cours de l'apprentissage de la lecture.

#### *1.4.4. Formalisation des hypothèses relatives à la spécialisation des mécanismes orthographiques au cours de l'apprentissage de la lecture*

##### **1.4.4.1. Rappel des données empiriques**

**Mécanisme d'Encodage Position-Spécifique.** Les données transversales disponibles suggèrent que la fonction de position sérielle et en particulier l'avantage de la première lettre obtenu dans la tâche TSI se renforce avec le développement des habilités de lecture (e.g., Grainger, Dufau, et al., 2016; Schubert et al., 2017).

**Mécanisme d'Encodage Position-Invariant.** Les données transversales soutenant le développement du mécanisme EPI, suggèrent que l'effet de transposition de lettres augmente avec le développement des habilités de lecture (e.g., Grainger, Lété, et al., 2012; Ziegler et al., 2014).

**Mécanisme d'Intégration Spatiale.** Les données actuellement disponibles suggèrent que l'effet d'intégration spatiale reste relativement stable, quel que soit le niveau des habiletés de lecture (Snell et al., 2021). Toutefois, comme discuté précédemment (p.67), il est possible que l'effet d'intégration spatiale puisse être modulé par les habilités de lecture si des contraintes plus fortes s'exercent sur le processus d'identification des mots écrits (e.g., mot rare). Cette hypothèse n'a néanmoins jamais été explorée.

##### **1.4.4.2. Formulation des hypothèses**

Conformément aux hypothèses relatives à l'émergence des mécanismes orthographiques, le mécanisme EPS devrait être le premier à se spécialiser. La notion de spécialisation doit ici être comprise dans le sens où une augmentation de l'amplitude des effets associés à chaque marqueur comportemental est attendue. Une potentielle phase en plateau pourrait être observée une fois que le mécanisme est totalement opérationnel. L'amplitude des effets pourra être considérée aussi bien sur les mesures de taux de précision que de temps de

réponse. Toutefois, les mesures obtenues sur les temps de réaction chez les jeunes enfants sont parfois difficilement interprétables et les mesures sur les taux de précision leur sont généralement préférées (Goswami et al., 2001). Dans le cas du mécanisme EPS, une augmentation de l'effet d'avantage de la première lettre (tâche TSI) est attendue au cours de l'apprentissage de la lecture. La question qui se pose est de savoir quel est le niveau de spécialisation suffisant pour déclencher l'émergence des mécanismes EPI et IS. Ce niveau de spécialisation sera appelé seuil de déclenchement. Une fois ce seuil atteint, les mécanismes EPI et IS peuvent entamer leur spécialisation. Conformément aux données de la littérature, la spécialisation du mécanisme EPI devrait générer une augmentation de l'effet TL (tâche SDM). En revanche, en contradiction avec les données existantes, l'effet d'intégration spatiale (tâche FLLD) devrait augmenter au cours de l'apprentissage de la lecture sous réserve de faire peser des contraintes sur les processus d'identification du mot écrit lors de la mesure de cet effet.

Par ailleurs, un aspect clé de l'hypothèse de coévolution est que la spécialisation d'un mécanisme donné est susceptible d'influencer la spécialisation d'un ou plusieurs autres mécanismes. Dans ce cadre, les hypothèses suivantes peuvent être formulées :

- (1) Le niveau de spécialisation du mécanisme EPS devrait contraindre le niveau de spécialisation EPI et IS. En effet, plus le mécanisme EPS met du temps à se spécialiser, plus la spécialisation des mécanismes EPI et IS devrait être retardée.
- (2) Le niveau de spécialisation du mécanisme EPI devrait contraindre le niveau de spécialisation du mécanisme IS.

Compte tenu de ces hypothèses, un retard dans l'émergence du mécanisme EPS et des difficultés à opérer sa spécialisation devrait entraîner un retard de l'émergence des mécanismes EPI et IS, ainsi qu'une difficulté à maîtriser ces derniers. Dans le canevas, illustré dans la Figure 21, la capacité à opérer rapidement la spécialisation des mécanismes orthographiques, et en particulier le mécanisme EPS, devrait affecter le niveau d'efficacité maximale qu'ils pourront atteindre.



Cette proposition est construite sur l'analogie de la personne illettrée qui, n'ayant pas été confronté de manière précoce à la lecture, ne pourra pas atteindre le niveau d'efficiency d'un individu normo-lecteur en dépit de ses efforts (voir Figure 21). En effet, dans les premiers mois de l'apprentissage de la lecture, les enfants bénéficient d'une plasticité neuronale accrue dans les zones sous-tendant les mécanismes orthographiques (Dehaene-Lambertz et al., 2018). Les enfants qui n'arriveraient pas tirer parti de cette période, pourraient ensuite rencontrer des difficultés à spécialiser les mécanismes orthographiques et ainsi rattraper leur retard. Dans ce cadre, il apparait peu probable que le scénario de la Figure 21 puisse advenir puisqu'un haut niveau de spécialisation EPI ne devrait être pas être possible tant que le mécanisme EPS n'a pas franchi le seuil de déclenchement. L'Étude n°2 (p.104) de cette thèse vise à produire une première caractérisation des relations d'efficiency existant entre les mécanismes orthographique chez des enfants de 6<sup>ème</sup> année ayant déjà mis en place ces mécanismes.

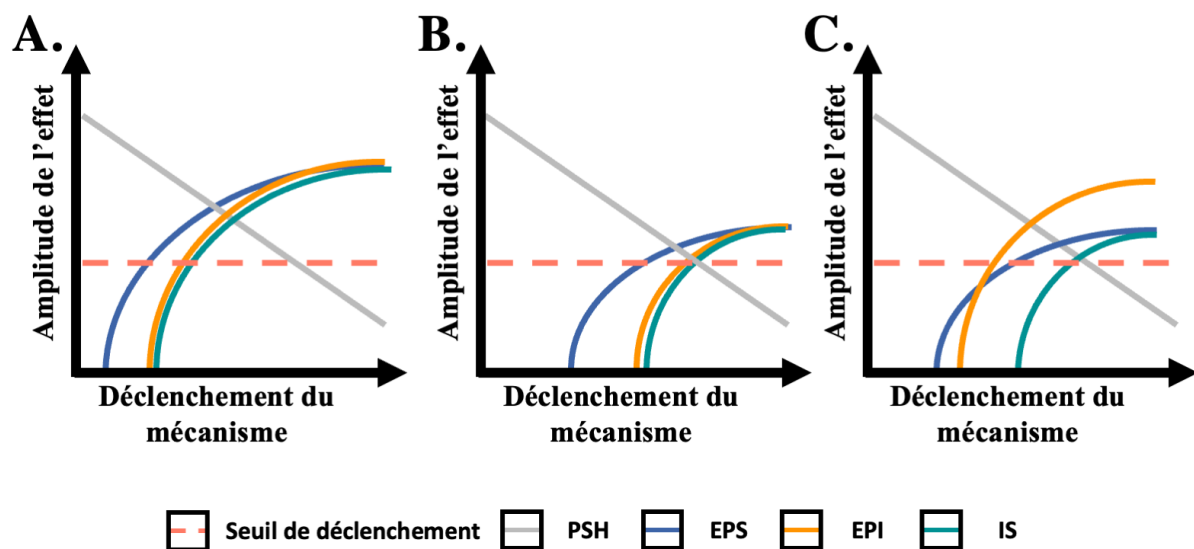


Figure 21. Représentation schématique des scénarios de spécialisation des mécanismes orthographiques au cours de l'apprentissage de la lecture.

## **CHAPITRE 2. ETUDES EXPERIMENTALES DE LA COEVOLUTION DES MECANISMES ORTHOGRAPHIQUES**

### **2.1. Étude 1. Effet de l'allongement de la durée de présentation dans les paradigmes d'investigation orthographique chez l'apprenti-lecteur.**

#### **2.1.1. Objectifs**

Au cours des dernières décennies, le traitement orthographique a été étudié dans trois tâches principales : la tâche d'identification de cible dans une chaîne (TSI, e.g., Marzouki & Grainger, 2014; Scaltritti & Balota, 2013; Tydgate & Grainger, 2009), la tâche de jugement perceptuel (SDM, e.g., Duñabeitia et al., 2012; Massol et al., 2013) et la tâche de décision lexicale (LDT, e.g., Perea et al., 2005; Perea & Carreiras, 2003). Ces tâches ont été administrées aussi bien chez l'adulte normo-lecteur que chez l'apprenti-lecteur en utilisant des procédures expérimentales souvent similaires. Toutefois, ces tâches s'avèrent souvent difficiles pour les apprenti-lecteurs qui commettent de nombreuses erreurs. Par exemple, Grainger, Bertrand, et al. (2016) ont exclu plus de la moitié des enfants testés car ils ne parvenaient pas à obtenir plus de 55% de bonnes réponses dans une tâche TSI. L'exclusion d'un tel nombre de participants peut amener à questionner la représentativité des conclusions établies par les auteurs. Toutefois, le choix de conserver ces participants dans les analyses est tout aussi problématique. Par exemple, Duñabeitia et al. (2015) concluent que l'absence d'effet de transposition de lettres dans la tâche SDM est la démonstration que les enfants pré-lecteurs n'ont pas développé de représentations invariantes à la position (pour plus de détail sur l'étude voir p.52). Cependant, Perea et al. (2016) notent que les enfants pré-lecteurs de cette étude présentaient des indices de sensibilités nuls, ce qui reflète leur incapacité à réaliser la tâche. Ainsi, l'inclusion d'enfants ne réussissant pas au-dessus de la chance tendrait à biaiser les résultats. Enfin, comme le souligne Grainger, Lété, et al. (2012), l'exclusion d'un grand nombre d'essais du fait des erreurs commises rend l'interprétation des temps de réaction moins fiable. Les temps de réaction sont

pourtant considérés comme une variable dépendante clé pour l'étude et la description du fonctionnement cognitif (voir Luce, 1986). En se privant de l'analyse des temps de réaction, la plupart des études développementales sur l'acquisition de la lecture (e.g., Goswami et al., 2001) réduisent leur portée explicative.

Afin de se prémunir de tels écueils, les auteurs proposent généralement d'adapter les procédures expérimentales utilisées chez l'adulte afin de réduire la difficulté des tâches chez la population apprenti-lectrice. L'une des adaptations les plus communément utilisées est l'allongement des durées de présentation. Par exemple, dans la tâche TSI utilisée par Grainger, Bertrand, et al. (2016) le stimuli critique était présenté pendant 300 ms, alors qu'il n'était présenté que 100 ms chez l'adulte (Tydgate & Grainger, 2009). Toutefois, comme nous l'avons vu plus haut, cet allongement des durées de présentation n'a pas permis d'éviter des taux d'erreurs importants qui ont conduit à l'exclusion de la moitié des participants. Face à ce problème, (Perea et al., 2016) ont proposé une solution plus radicale qui consistait à opérer une série d'adaptations de la procédure expérimentale afin de réduire les ressources cognitives exigées par la tâche. Réalisé pour une tâche SDM, ces adaptations résidaient dans (1) la réduction de la longueur des chaînes de 4 à 2 caractères, (2) la présentation des chaînes simultanément plutôt que séquentiellement, (3) la production d'une réponse verbale plutôt que motrice, (4) la réduction du nombre d'essais expérimentaux, et (5) la présentation de caractères majuscules plutôt que minuscules. Ces adaptations ont permis aux enfants pré-lecteurs de réussir avec succès la tâche SDM. Cependant, l'impact individuel de chacune de ces modifications n'a pas été évalué. À l'instar du choix d'allonger les durées de présentation, les adaptations apportées aux procédures expérimentales utilisées chez l'apprenti-lecteur sont généralement réalisées de manière ad hoc, sans aucune évaluation systématique. Toutefois, dans une démarche de sciences reproductibles (Munafò et al., 2017), de telles évaluations devraient être menées afin de mesurer l'impact individuel d'une adaptation sur la performance à une tâche

considérée. De telles évaluations permettraient d'établir des comparaisons plus directes entre les études développementales.

L'objectif de la présente étude est précisément de réaliser une évaluation systématique de l'effet de la durée de présentation dans les trois tâches susmentionnées. La durée de présentation est en effet le facteur le plus couramment manipulé lors de l'adaptation des procédures expérimentales chez l'apprenti-lecteur. Cette manipulation, réalisée sans évaluation systématique, conduit à l'utilisation de durées de présentation non-reproductibles à travers les études. Par exemple, dans des études chez l'apprenti-lecteur utilisant la tâche TSI, Grainger, Bertrand, et al. (2016) ont utilisé une durée de présentation de 300 ms alors que Schubert et al., (2017) ont utilisé une durée de présentation de 200 ms. Le choix de la durée de présentation peut également varier au sein d'une même étude. Par exemple, dans une étude utilisant la tâche FLLD, Snell et al. (2021) utilisés des durées de présentation différenciées pour les enfants de 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> année (300 ms) et les enfants plus âgés (250 ms). Ce choix était motivé par une étude pilote, dont les résultats n'ont pas été reportés, montrant que les enfants de 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> année étaient incapables de réaliser la tâche lorsque le stimuli était présenté pendant 250 ms. L'idée d'affecter des durées de présentation plus longues aux enfants les plus jeunes peut apparaître triviale dans la mesure où ces enfants ont également de faibles niveaux de lecture. Cependant, au cours de l'apprentissage de la lecture, l'âge et le niveau de lecture se décorrèlent, révélant une large hétérogénéité des niveaux de lecture au sein d'un même groupe scolaire (e.g., Lubineau et al., 2021). Dès lors, en considérant que la performance à une tâche orthographique puisse s'expliquer par le niveau de lecture (e.g., Beyersmann et al., 2016), il apparait important de déterminer s'il est préférable d'appliquer une adaptation de la durée de présentation en fonction du niveau de lecture ou du niveau scolaire.

Dans cette perspective, la présente étude vise à investiguer l'effet de la durée de présentation chez des enfants de la 2<sup>ème</sup> année à la 5<sup>ème</sup> année et un groupe d'adulte dans les trois

principales tâches utilisées sur l'investigation du traitement orthographique : la tâche d'identification de cible dans une chaîne (TSI), la tâche de jugement perceptuel (SDM) et la tâche de décision lexicale (LDT). Pour les tâches TSI et LDT, cinq durées de présentation ont été manipulées : 150, 233, 317, 400 et 483 ms ; pour la tâche SDM, quatre durées de présentation ont été manipulées : 300, 600, 900 et 1200 ms. Le premier objectif était de décrire l'évolution de l'index de sensibilité en fonction de la durée de présentation dans chacune des tâches considérées. Le second objectif consistait à déterminer le facteur devant guider le choix de durées de présentation différenciées dans une perspective développementale. Ces deux objectifs devaient permettre in fine de formuler des préconisations pour les futures études souhaitant utiliser ces paradigmes.

### ***2.1.2. Méthode***

#### **2.1.2.1. Participants**

Cent-quarante-et-un enfants d'une école primaire de Lyon (France) ont été testés au début de l'année scolaire, au mois de novembre. L'échantillon de 141 enfants était composé de 44 enfants de 2<sup>ème</sup> année (2A), de 32 enfants de 3<sup>ème</sup> année (3A), de 31 enfants de 4<sup>ème</sup> année (4A) et de 34 enfants de 5<sup>ème</sup> année (5A). Un groupe de 22 adultes (AD) a également été testé. Les participants ont réalisé trois tâches orthographiques et leur niveau d'efficacité en lecture a été évalué à l'aide du test de lecture de l'*Alouette* (Lefavrais, 2005). Tous les participants étaient de langue maternelle française et avaient une vision normale ou corrigée à la normale. Un consentement éclairé a été fourni par les parents de chaque enfant, ou par le participant si celui-ci était majeur, avant l'expérimentation. L'étude a été approuvée par le comité d'éthique du Comité de protection des personnes SUD-EST IV (n°17/051) et a été réalisée conformément aux directives et règlements inhérents à la Déclaration d'Helsinki.

## **2.1.2.2. Tâche d'identification de caractère dans une chaîne (TSI)**

### **2.1.2.2.1. Stimuli**

Dix-huit consonnes majuscules (B, C, D, F, G, H, J, K, L, M, N, P, Q, R, S, T, V, Z) ont été utilisées pour générer 200 chaînes de cinq consonnes différentes. Dans chaque chaîne, une des cinq consonnes était désignée comme cible (e.g., la lettre B pour la chaîne QCJBN). Pour chaque cible, une consonne alternative, non présente dans la chaîne, était appariée afin que deux réponses soient possibles : une réponse "oui" si la consonne cible était présente dans la chaîne ou une réponse "non" si la consonne cible n'était pas présente.

### **2.1.2.2.2. Design expérimental**

Cinq conditions de durée d'affichage ont été utilisées avec un pas de 83 ms : 150, 233, 317, 400, 483 ms. Un design expérimental en triple carré latin a été utilisé pour que chaque chaîne soit présentée dans les cinq conditions de durée d'affichage sur l'ensemble des participants, à toutes les positions et pour les deux types réponses, de sorte que les participants ne voient qu'une seule fois chaque chaîne.

### **2.1.2.2.3. Procédure**

La procédure expérimentale a été implémentée à l'aide du logiciel *OpenSesame* (Mathôt et al., 2012). Les caractères étaient affichés en police Courier New 14 pt de couleur noire, sur fond gris. Chaque essai débutait avec une croix de fixation au centre de l'écran pendant 667 ms. La chaîne de consonnes était ensuite présentée pendant la durée correspondante à la condition expérimentale (150, 233, 317, 400 ou 483 ms). Puis, la chaîne était immédiatement remplacée pendant 500 ms par un masque constitué d'une suite de cinq dièzes. Simultanément à la présentation du masque, une des cinq positions était signalée par deux traits au-dessus et en dessous d'un dièze pour indiquer la position de la consonne cible à détecter dans la chaîne.

Après ces 500 ms, la consonne cible était affichée. Les participants devaient indiquer si cette consonne cible était présente ou non dans la chaîne à la position indiquée. Les réponses étaient recueillies à l'aide d'un joystick (bouton droit pour OUI, bouton gauche pour NON ; et inversement pour les participants gauchers). Le masque, la position signalée, et la consonne cible restaient affichés jusqu'à la réponse du participant. Les stimuli étaient subdivisés en cinq blocs de 40 stimuli. Une pause était possible entre chaque bloc. La durée totale de passation était d'environ 15 minutes. La procédure expérimentale d'un essai est illustrée dans la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

### **2.1.2.3. Tâche de jugement perceptif (SDM)**

#### **2.1.2.3.1. Stimuli**

Dix-huit consonnes majuscules (B, C, D, F, G, H, J, K, L, M, N, P, Q, R, S, T, V, Z) ont été utilisées pour générer 192 chaînes de 4 consonnes. Chaque chaîne était appariée avec quatre autres chaînes de quatre consonnes qui ne différaient que d'une seule lettre à une des quatre positions (e.g., la chaîne MCJK a été appariée aux chaînes BCJK, MBJK, MCBK et MCJB). Ces chaînes permettaient de construire les essais "différents" de la tâche de jugement perceptif (e.g., essai identique : MCJK-MCJK vs. essai différent : MCJK-MBJK).

#### **2.1.2.3.2. Design expérimental**

Quatre conditions de durée d'affichage ont été utilisées avec un pas de 300 ms : 300 ms, 600 ms, 900 ms, 1200 ms. Un design expérimental en triple carré latin a été utilisé afin que chaque chaîne soit présentée dans les quatre conditions de durée d'affichage, et testée pour toutes les positions de lettres pour chaque type de réponse, de sorte que chaque participant ne voit qu'une seule fois chaque stimulus.

### 2.1.2.3.3. Procédure

La procédure expérimentale a été implémentée à l'aide du logiciel *OpenSesame* (Mathôt et al., 2012). Les caractères étaient affichés en police Courier New 14 pt de couleur noire, sur fond gris. Chaque essai débutait avec une croix de fixation au centre de l'écran pendant 667 ms. Puis la chaîne de référence était présentée pendant la durée correspondante à la condition expérimentale (300, 600, 900 ou 1200 ms) avant d'être masquée pendant 500 ms. Le masque était ensuite remplacé par la chaîne cible jusqu'à ce que le participant réponde. Les participants devaient décider si la chaîne cible était identique à la chaîne de référence à l'aide d'un joystick (bouton droit pour OUI, bouton gauche pour NON ; et inversement pour les participants gauchers). Les essais étaient subdivisés en 6 blocs de 32 essais. Une pause était ménagée entre chaque bloc. La durée totale de passation était d'environ 15 minutes. La procédure expérimentale d'un essai est illustrée dans la Figure 22.

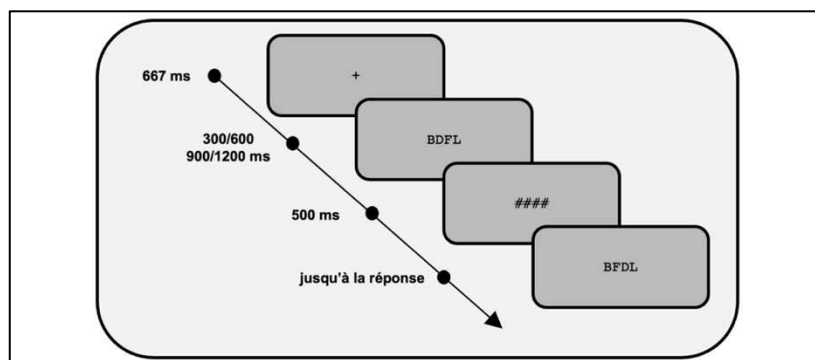


Figure 22. Illustration de la procédure expérimentale de la tâche de jugement perceptif (SDM) utilisée dans l'Étude 1

### 2.1.2.4. Tâche de décision lexicale (LD).

#### 2.1.2.4.1. Stimuli

Cent mots ont été sélectionnés dans la base de données *Manulex* (Lété et al., 2004). Tous les mots étaient composés de 4 lettres et avaient une fréquence lexicale répertoriée au Grade 1 dans la base de données *Manulex*. Ce contrôle permettait de s'assurer que les mots étaient régulièrement rencontrés par des lecteurs débutants. Les mots ne contenaient aucun signe diacritique. La fréquence lexicale moyenne de ces mots par million était de 161 (SD = 171).



Les mots étaient étiquetés comme verbes, adjectifs, participes, pronoms, adverbes ou auxiliaires. Afin de minimiser les taux d'erreur, une simulation virtuelle de la tâche de décision lexicale a été réalisée en utilisant les taux d'erreurs fournis par les données du *French Lexicon Project* (Ferrand et al., 2010)<sup>11</sup>. Cent pseudo-mots ont été sélectionnés dans la base de données du *French Lexicon Project* sur la base de leur taux d'erreur qui devait être inférieur à 10%. Les pseudo-mots ont été appariés aux mots sélectionnés sur la base de leur similarité orthographique. La similarité orthographique a été calculée à l'aide de la fonction `old20` du package R *vwr* (Keuleers, 2013) basé sur l'*Orthographic Levenshtein Distance* measure (Yarkoni et al., 2008).

#### **2.1.2.4.2. Design expérimental**

Cinq conditions de durée d'affichage ont été utilisées avec un pas de 83 ms : 150 ms, 233 ms, 317 ms, 400 ms, 483 ms. Un design expérimental en carré latin a été utilisé afin que les mots soient présentés à travers les participants dans les cinq conditions d'affichage.

#### **2.1.2.4.3. Procédure**

La procédure expérimentale a été implémentée à l'aide du logiciel *OpenSesame* (Mathôt et al., 2012). Les caractères étaient affichés en police Courier New 14 pt de couleur noire, sur fond gris. Chaque essai débutait par une croix de fixation au centre de l'écran pendant 667 ms. Puis, le stimulus cible était présenté pendant une durée correspondante à une des cinq durées d'affichage (150, 233, 317, 400 ou 483 ms). Le stimulus était ensuite remplacé par un point d'interrogation jusqu'à la réponse du participant. Les participants répondaient à l'aide d'un joystick (bouton droit pour OUI, bouton gauche pour NON ; et inversement pour les participants gauchers). Une pause était ménagée entre chaque bloc. La durée totale de passation

---

<sup>11</sup> Le taux d'erreur le plus élevé parmi les mots sélectionnés dans la présente étude était de 16%. La moyenne de ces taux d'erreurs était de 2%.

était d'environ 15 minutes. La procédure expérimentale d'un essai est illustrée dans la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

### **2.1.3. Résultats**

Les données brutes ont été traitées à l'aide du logiciel R (R Core Team, 2020). Six participants ont été exclus des analyses à la suite d'une mauvaise compréhension des consignes (3A = 1, 4A = 1, 5A = 3, AD = 1). L'échantillon final retenu pour les analyses était composé de 44 enfants de 2<sup>ème</sup> année, 31 enfants de 3<sup>ème</sup> année, 30 enfants de 4<sup>ème</sup> année, 31 enfants de 5<sup>ème</sup> année, et 21 adultes. Deux analyses ont été menées :

- 1) Une analyse de détection du signal visant à décrire la performance des participants dans chaque tâche orthographique en fonction de la durée de présentation et du niveau de lecture.
- 2) Une analyse de classification visant à explorer les profils d'expertise orthographique qui devraient permettre de préciser les critères à utiliser pour le choix des durées de présentation. Cette analyse prenait uniquement en paramètres d'entrée la performance aux trois tâches orthographiques et était aveugle au niveau scolaire et au niveau de lecture des participants.

#### **2.1.3.1. Analyse de détection du signal**

Dans un premier temps, nous avons calculé les index de sensibilité ( $d'$ ) et de biais ( $c$ ) à partir du pourcentage de détections correctes et de fausses alarmes. Pour chaque tâche orthographique, une valeur de sensibilité et de biais a été obtenue en fonction du temps d'affichage et du niveau de lecture des participants. Le niveau de lecture était codé par une variable à trois niveaux : débutant, intermédiaire et avancé. Les participants étaient assignés à l'un de ces trois niveaux sur la base de leur score CTL au test de *L'Alouette* en accord avec les normes de (Lefavrais, 2005). Le niveau de lecture du groupe débutant n'excédait pas le niveau

moyen attendu en 3<sup>ème</sup> année (CE2) ( $M = 126$ ,  $SD = 44$  ;  $2A = 38$ ,  $3A = 17$ ,  $4A = 8$ ,  $5A = 6$ ). Le niveau de lecture du groupe intermédiaire était compris entre le niveau moyen attendu en 3<sup>ème</sup> année et celui attendu en 9<sup>ème</sup> année (3<sup>ème</sup> de collège) ( $M = 291$ ,  $SD = 53$  ;  $2A = 6$ ,  $3A = 14$ ,  $4A = 19$ ,  $5A = 20$ ,  $6A = 1$ ). Enfin, le niveau de lecture du groupe avancé était supérieur au niveau moyen attendu en 9<sup>ème</sup> année ( $M = 501$ ,  $SD = 74$  ;  $4A = 3$ ,  $5A = 5$ ,  $6A = 20$ ). Les performances des participants par condition expérimentale et en fonction du type d'essai (détectations correctes, rejections correctes, fausses alarmes, omissions) sont reportées dans le Tableau 2. La Figure 23 représente les valeurs de sensibilité et de biais pour chaque durée de présentation et chaque tâche orthographique.

L'analyse des index de sensibilité a révélé que l'allongement de la durée de présentation générait une amélioration de la sensibilité<sup>12</sup> quelle que soit la tâche considérée ( $\Delta TSI = 0.56$ ;  $\Delta SDM = 0.64$ ;  $\Delta LDT = 0.36$ ). Cet effet était observable pour l'ensemble des groupes de lecture quelle que soit la tâche. Toutefois, les lecteurs avancés tiraient un plus grand bénéfice de l'allongement des durées de présentation que les lecteurs débutants ( $TSI : \Delta AVA = 0.75$  vs.  $\Delta DEB = 0.49$ ;  $SDM : \Delta AVA = 0.75$  vs.  $\Delta DEB = 0.36$ ;  $LDT : \Delta AVA = 0.43$  vs.  $\Delta DEB = 0.24$ ). Par ailleurs, quelle que soit la tâche considérée plus le niveau de lecture était élevé, plus la sensibilité moyenne à la tâche était élevée ( $TSI : AVA = 2.18$  vs.  $DEB = 0.60$ ;  $SDM : AVA = 3.21$  vs.  $DEB = 0.94$ ;  $LDT : AVA = 3.73$  vs.  $DEB = 1.39$ ). Enfin, les index de

---

<sup>12</sup> L'amélioration de la sensibilité est ici mesurée par la différence des index de sensibilité entre la durée de présentation la plus longue et la durée de présentation la plus courte.

sensibilité étaient en moyenne moins élevés pour les tâches TSI (1.06) et SDM (1.65) que pour la tâche LDT (2.31).

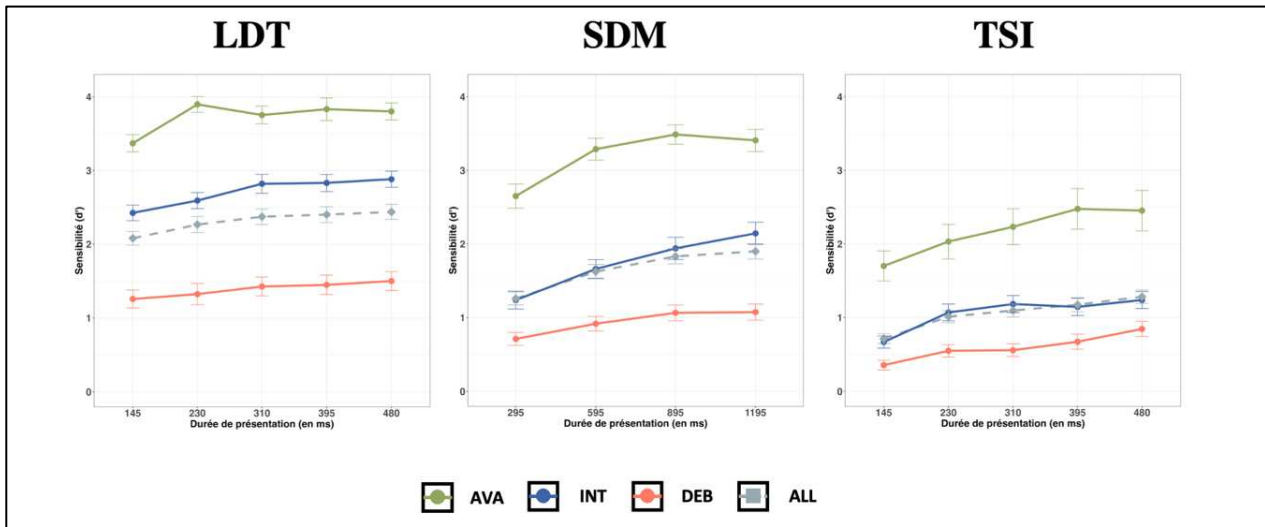


Figure 23. Évolution des index de sensibilité ( $d'$ ) en fonction de la durée de présentation et du niveau de lecture (AVA : avancé, INT : intermédiaire, DEB : débutant, ALL = tous les participants) pour chaque tâche orthographique.

Tableau 2. Pourcentage moyen de réponse (erreur type entre parenthèses) pour chaque type de réponse (DC : détections correctes, RC : rejets corrects, FA : fausses alarmes et O : omissions) en fonction de la durée d'affichage (en italique les durées d'affichage utilisées dans la tâche de jugement perceptuel) et du niveau de lecture (DEB : débutant, INT : intermédiaire ; AVA : avancé).

| Groupe | Durée (en ms) | TSI    |        |        |        | SDM    |        |        |        | LDT    |        |        |        |
|--------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|        |               | DC     | RC     | FA     | O      | DC     | RC     | FA     | O      | DC     | RC     | FA     | O      |
| DEB    | 150           | 48.28  | 63.17  | 36.83  | 51.72  | 69.11  | 54.33  | 45.67  | 30.89  | 81.04  | 57.30  | 42.70  | 18.96  |
|        | 300           | (2.26) | (2.38) | (2.38) | (2.26) | (2.42) | (2.37) | (2.37) | (2.42) | (1.99) | (3.00) | (3.00) | (1.99) |
|        | 233           | 55.23  | 63.59  | 36.41  | 44.77  | 74.17  | 55.18  | 44.82  | 25.83  | 79.29  | 59.86  | 40.14  | 20.71  |
|        | 600           | (2.19) | (2.28) | (2.28) | (2.19) | (2.56) | (2.22) | (2.56) | (2.22) | (2.05) | (3.12) | (3.12) | (2.05) |
|        | 317           | 55.58  | 62.80  | 37.20  | 44.42  | 75.85  | 57.84  | 42.16  | 24.15  | 80.20  | 63.03  | 36.97  | 19.80  |
|        | 900           | (2.09) | (2.55) | (2.55) | (2.09) | (2.49) | (2.38) | (2.38) | (2.49) | (2.00) | (2.98) | (2.98) | (2.00) |
|        | 400           | 55.59  | 65.35  | 34.65  | 44.41  | 75.67  | 57.35  | 42.65  | 24.33  | 80.61  | 62.83  | 37.17  | 19.39  |
|        | 1200          | (1.94) | (2.72) | (2.72) | (1.94) | (2.40) | (2.42) | (2.42) | (2.40) | (1.85) | (2.89) | (2.89) | (1.85) |
| INT    | 483           | 60.43  | 66.68  | 33.32  | 39.57  |        |        |        |        | 80.39  | 64.26  | 35.74  | 19.61  |
|        |               | (2.04) | (2.61) | (2.61) | (2.04) |        |        |        |        | (1.86) | (2.80) | (2.80) | (1.86) |
|        | 150           | 56.35  | 66.38  | 33.62  | 43.65  | 76.86  | 63.89  | 36.11  | 23.14  | 90.40  | 79.03  | 20.97  | 9.60   |
|        | 300           | (2.26) | (2.46) | (2.46) | (2.26) | (2.18) | (2.35) | (2.35) | (2.18) | (0.94) | (2.16) | (2.16) | (0.94) |
|        | 233           | 64.73  | 69.35  | 30.65  | 35.27  | 82.47  | 70.31  | 29.69  | 17.53  | 90.43  | 82.52  | 17.48  | 9.57   |
|        | 600           | (2.16) | (2.74) | (2.74) | (2.16) | (1.77) | (2.27) | (2.27) | (1.77) | (1.03) | (2.00) | (2.00) | (1.03) |
|        | 317           | 67.43  | 71.12  | 28.88  | 32.57  | 83.84  | 74.27  | 25.73  | 16.16  | 91.70  | 84.75  | 15.25  | 8.30   |
|        | 900           | (2.24) | (2.69) | (2.69) | (2.24) | (2.04) | (2.33) | (2.33) | (2.04) | (1.01) | (1.90) | (1.90) | (1.01) |
| AVA    | 400           | 66.07  | 70.53  | 29.47  | 33.93  | 84.85  | 77.56  | 22.44  | 15.15  | 91.78  | 84.83  | 15.17  | 8.22   |
|        | 1200          | (2.41) | (2.58) | (2.58) | (2.41) | (2.09) | (2.35) | (2.35) | (2.09) | (1.02) | (1.88) | (1.88) | (1.02) |
|        | 483           | 66.02  | 74.72  | 25.28  | 33.98  |        |        |        |        | 92.68  | 85.08  | 14.92  | 7.32   |
|        |               | (2.17) | (2.31) | (2.31) | (2.17) |        |        |        |        | (0.82) | (1.63) | (1.63) | (0.82) |
|        | 150           | 64.46  | 83.89  | 16.11  | 35.54  | 84.68  | 89.74  | 10.26  | 15.32  | 95.75  | 91.29  | 8.71   | 4.25   |
|        | 300           | (3.60) | (3.71) | (3.71) | (3.60) | (2.54) | (1.52) | (1.52) | (2.54) | (0.71) | (1.11) | (1.11) | (0.71) |
|        | 233           | 71.00  | 86.79  | 13.21  | 29.00  | 92.64  | 93.73  | 6.27   | 7.36   | 97.21  | 95.07  | 4.93   | 2.79   |
|        | 600           | (3.53) | (3.38) | (3.38) | (3.53) | (1.16) | (0.87) | (0.87) | (1.16) | (0.52) | (0.86) | (0.86) | (0.52) |
| AVA    | 317           | 71.21  | 88.68  | 11.32  | 28.79  | 94.43  | 94.02  | 5.98   | 5.57   | 96.89  | 93.50  | 6.50   | 3.11   |
|        | 900           | (3.78) | (3.37) | (3.37) | (3.78) | (0.90) | (0.97) | (0.97) | (0.90) | (0.57) | (1.17) | (1.17) | (0.57) |
|        | 400           | 77.39  | 88.71  | 11.29  | 22.61  | 94.82  | 91.71  | 8.29   | 5.18   | 97.50  | 92.57  | 7.43   | 2.50   |
|        | 1200          | (3.51) | (3.66) | (3.66) | (3.51) | (1.25) | (1.34) | (1.34) | (1.25) | (0.57) | (1.66) | (1.66) | (0.57) |
|        | 483           | 78.07  | 87.29  | 12.71  | 21.93  |        |        |        |        | 97.54  | 93.57  | 6.43   | 2.46   |
|        |               | (3.24) | (3.67) | (3.67) | (3.24) |        |        |        |        | (0.44) | (1.06) | (1.06) | (0.44) |

## 2.1.3.2. Analyse de classification

### 2.1.3.2.1. Procédure de classification

Afin d'identifier les facteurs devant guider les choix des durées de présentation, une analyse de classification a été réalisée à l'aide du logiciel R (R Core Team, 2020). En suivant les recommandations d'études antérieures (Hayenga & Corpus, 2010; Rosenzweig & Wigfield, 2017; Vansteenkiste et al., 2009; Wang, 2021), les participants ont été classifiés sur la base de leur sensibilité<sup>13</sup> ( $d'$ ) aux trois tâches orthographiques en utilisant une procédure de classification séquentielle à deux étapes. La première étape consistait à appliquer une classification ascendante hiérarchique utilisant la méthode de Ward implémentée à l'aide du package R *stats* (R Core Team, 2020). La seconde étape consistait à appliquer l'analyse de classification utilisant l'algorithme k-means proposé par Hartigan et Wong (1979) et implémenté par le même package R. Pour ces analyses, les index de sensibilité ( $d'$ ) obtenus dans chaque tâche ont été transformés en z-score sur l'ensemble des participants.

Premièrement, la classification ascendante hiérarchique visait à déterminer le nombre de clusters appropriés. Cette méthode étant sensible aux valeurs aberrantes (Vansteenkiste et al., 2009; Wormington et al., 2012), les participants ayant une valeur de sensibilité s'écartant de +/- 3SD dans au moins l'une des tâches ont été retirés des analyses ( $N = 2 : 1$  Adulte et 1 2A). L'observation du dendrogramme obtenu a révélé que la solution de classification à deux clusters était la plus viable. Cette observation était conforme à l'estimation du nombre de clusters fournie par la méthode d'Elbow (Thorndike, 1953) et le coefficient de silhouette (Rousseeuw, 1987).

Deuxièmement, l'analyse de classification par k-means visait à affiner la solution de classification retenue. Dans cette analyse, le chercheur spécifie le nombre de clusters à utiliser

---

<sup>13</sup> Dans cette analyse, les index de sensibilité ont été calculés sans prendre en considération les conditions expérimentales de durées de présentation. Par ailleurs, seuls les index de sensibilités sont donnés en entrée au modèle. Par conséquent, l'analyse est aveugle au niveau scolaire et au niveau de lecture des participants.

pour la classification sur la base des résultats obtenus à l'aide de la classification ascendante hiérarchique (i.e.,  $N = 2$ ). La stabilité<sup>14</sup> de la classification obtenue a été éprouvée en utilisant un rééchantillonnage par bootstrap implémenté à l'aide de la fonction *clusterboot* du package *R.fpc* (Hennig, 2010)<sup>15</sup>. Le coefficient de Jaccard obtenu à l'aide de la fonction *clusterboot* pour chacun des deux clusters était élevé ( $> .90$ ) témoignant de la stabilité de la solution à deux clusters. Le Tableau 3 résume les caractéristiques des deux clusters obtenus qui seront appelés ci-après : cluster de Faible Performance Orthographique (FPO, C1) et cluster de Haute Performance Orthographique (HPO, C2).

Tableau 3. Caractérisation des deux clusters obtenus sur la base du niveau de lecture (score CTL obtenu à l'Alouette) et des index de sensibilités ( $d'$ ) obtenus à chaque tâche orthographique (écart-type entre parenthèse, et étendue entre crochets). Le tableau reporte également la répartition des participants dans chaque cluster en fonction de leur groupe de lecture (Débutant, Intermédiaire, Avancé) et de leur niveau scolaire (2<sup>ème</sup> année, 3<sup>ème</sup> année, 4<sup>ème</sup> année, 5<sup>ème</sup> année, et adulte).

| Cluster | CTL<br>Alouette | Sensibilité ( $d'$ ) |                |               | Effectif par groupe de lecture |     |     | Effectif par grade |    |    |    |    |
|---------|-----------------|----------------------|----------------|---------------|--------------------------------|-----|-----|--------------------|----|----|----|----|
|         |                 | TSI                  | SDM            | LDT           | DEB                            | INT | AVA | 2A                 | 3A | 4A | 5A | AD |
| C1      | 168 (79)        | .48 (.44)            | .91 (.63)      | 1.43 (.85)    | 60                             | 30  | 0   | 40                 | 22 | 16 | 11 | 1  |
|         | [42 - 359]      | [-.28 - 1.80]        | [-1.36 - 2.35] | [-.31 - 2.90] |                                |     |     |                    |    |    |    |    |
| C2      | 366 (133)       | 1.73 (.74)           | 2.52 (.73)     | 3.25 (.59)    | 9                              | 29  | 27  | 4                  | 9  | 13 | 20 | 19 |
|         | [95 - 667]      | [.32 - 3.50]         | [1.27 - 4.35]  | [2.00 - 4.65] |                                |     |     |                    |    |    |    |    |

### 2.1.3.2.2. Description de la solution de classification

La solution de classification retenue fait émerger deux clusters qui diffèrent significativement en fonction du niveau de lecture et du  $d'$  sur l'ensemble des tâches orthographiques. Les participants du cluster à Faible Performance Orthographique (FPO –

<sup>14</sup> La stabilité d'une solution de classification permet de déterminer si la solution retenue (i.e., 2 clusters) est reproductible lorsque l'algorithme de classification est utilisé avec des paramètres d'initialisations différents ou des sous-ensembles de données différents.

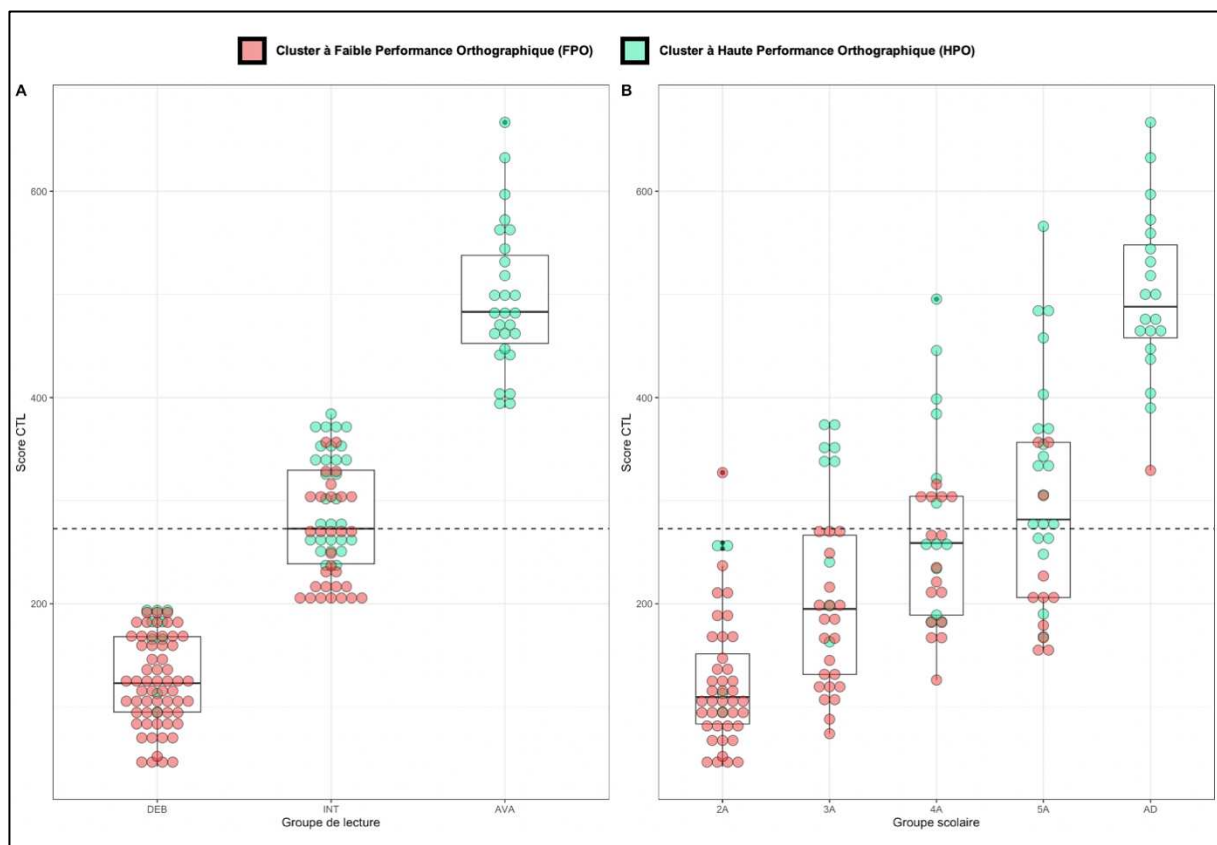
<sup>15</sup> Pour une description complète de l'algorithme voir Hennig (2007)

cluster 1) avaient un score CTL significativement plus faible ( $M = 168$ ,  $SD = 79$ ) que les participants du cluster à Haute Performance Orthographique (HPO – cluster 2 ;  $M = 366$ ,  $SD = 133$ ;  $t(96.56) = 10.73$ ,  $p < .001$ ). De plus, les participants du cluster FPO avait des index de sensibilités significativement plus faibles (TSI :  $M = .48$ ,  $SD = .91$ ; SDM :  $M = .91$ ,  $SD = .63$ ; LDT :  $M = 1.43$ ,  $SD = .85$ ) que les participants du cluster HPO dans chacune des tâches orthographiques (TSI :  $M = 1.73$ ,  $SD = .74$ ; SDM :  $M = 2.52$ ,  $SD = .73$ ; LDT :  $M = 3.25$ ,  $SD = .59$ ; TSI :  $t(96.82) = 12.15$ ,  $p < .001$ ; SDM :  $t(153) = 12.64$ ,  $p < .001$ ; LDT :  $t(152.73) = 15.81$ ,  $p < .001$ ).

Par ailleurs, la qualité de la partition des clusters de performances orthographiques semble particulièrement bien expliquée par le niveau de lecture. Ainsi, 100% des participants ayant un niveau de lecture supérieur à celui attendu en 9<sup>ème</sup> année sont classifiés dans le cluster à HPO, alors que 87% des participants ayant un niveau de lecture inférieur à celui attendu en 3<sup>ème</sup> année, sont classifiés dans le cluster à FPO. De manière intéressante, les participants ayant un niveau de lecture compris entre celui attendu en 3<sup>ème</sup> année et celui attendu en 9<sup>ème</sup> année sont classifiés dans des proportions équivalentes dans les clusters FPO (30/59) et HPO (29/59). La lecture de la Figure 24.A permet de mettre en évidence que dans ce groupe de lecteurs intermédiaires, le niveau médian de lecture ( $CTL = 272.73$ ) semble être un bon prédicteur de la classification de ces lecteurs dans les clusters FPO et HPO. Ainsi, les lecteurs intermédiaires ayant un niveau de lecture inférieur au niveau médian sont majoritairement classés dans le cluster FPO (19/29). A l'inverse, ceux ayant un niveau de lecture supérieur ou égal au niveau médian sont majoritairement classés dans le cluster HPO (19/30).

En revanche, si la qualité de la partition des clusters par le niveau scolaire semble être bien expliqué chez les lecteurs débutants (91% sont classifiés dans le cluster FPO) et les lecteurs adultes (95% sont classifiés dans le cluster HPO), la situation est plus contrastée pour les apprenti-lecteurs de la 2<sup>ème</sup> à la 5<sup>ème</sup> année. Pour ces trois niveaux scolaires, la proportion de

participant se trouvant respectivement dans les clusters FPO et HPO est plus équilibrée. Cette situation est particulièrement saillante chez les lecteurs de 4<sup>ème</sup> année chez qui la proportion d'enfants appartenant au cluster FPO (55%) est proche de celle appartenant au cluster HPO (45%). Toutefois, à l'intérieur de ces trois groupes, l'utilisation du niveau seuil de lecture identifié dans le paragraphe précédent (CTL = 272.73) permet de mieux expliquer la classification. Ainsi, dans le groupe des enfants de 4<sup>ème</sup> année, si 55% des enfants sont classifiés dans le cluster FPO, c'est 61% des enfants en-dessous du niveau seuil de lecture qui sont classifiés dans le cluster FPO. La Figure 24.B illustre ces observations.



### 2.1.4. Discussion

La présente étude visait à étudier l'effet de la durée de présentation chez des enfants de la 1<sup>ère</sup> à la 5<sup>ème</sup> année et un groupe d'adulte dans les trois principales tâches utilisées pour



l'investigation du traitement orthographique (TSI, SDM, LDT). L'objectif était de vérifier que l'allongement des durées de présentation permettait d'accroître la sensibilité aux tâches orthographiques et de formuler des préconisations pour les études futures. D'une part, l'analyse de détection du signal a révélé que l'allongement des durées de présentation permettait une augmentation de l'index de sensibilité qui avait une amplitude plus importante pour les meilleurs lecteurs, et cela quelle que soit la tâche considérée. D'autre part, l'analyse de classification a révélé que les participants pouvaient être classifiés selon deux profils d'expertise orthographique : un profil de Faible Performance Orthographique (FPO) et un profil de Haute Performance Orthographique (HPO). L'étude de ces profils a révélé que l'appartenance à un profil donné était mieux expliquée par le niveau de lecture que par le groupe scolaire<sup>16</sup>.

#### **2.1.4.1. Analyse de la modulation des indices de sensibilités par l'allongement des durées de présentation.**

De manière prévisible, la présente étude a permis de démontrer que l'augmentation de la durée de présentation générait une augmentation de la sensibilité dans chacune des tâches orthographiques (TSI, SDM, et LDT). Ce résultat corrobore les observations réalisées chez l'adulte normo-lecteur, révélant que la sensibilité dans une tâche de décision grammaticale augmentait lorsque les durées de présentation étaient allongées (Mirault & Grainger, 2020). Des observations similaires avaient été réalisées dans des études psychophysiques dans les années cinquante. Ces études, recourant à des présentations tachiscopiques, avaient démontré que la durée de présentation minimale pour percevoir un mot était dépendante de la longueur et de la fréquence de celui-ci : plus le mot était rare et plus celui-ci était long, plus la durée de présentation devait être longue pour que le participant soit capable de le percevoir (Howes & Solomon, 1951; McGinnies et al., 1952). Le seuil de perception chez l'adulte normo-lecteur

---

<sup>16</sup> Comme précisé dans les sections précédentes, le lecteur notera que seuls les indices de sensibilités aux tâches orthographiques étaient saisis dans le modèle. Par conséquent l'analyse de classification était aveugle au niveau scolaire et au niveau de lecture des participants.

semblent donc influencé par les caractéristiques intrinsèques des stimuli. L'influence de ces caractéristiques n'a toutefois pas été manipulée dans la présente étude.

Chez l'apprenti-lecteur, ce sont principalement les contraintes inhérentes à la tâche, plutôt que les contraintes inhérentes aux stimuli, qui sont source de difficultés dans les tâches orthographiques. Bien que la présente étude n'ait pas été conçue à ces fins<sup>17</sup>, nos résultats suggèrent que l'allongement de la durée de présentation est particulièrement adapté pour les tâches posant le plus de difficulté. Dans la présente étude, les tâches TSI et SDM sont celles qui sont susceptibles de poser le plus de difficultés. Ce sont des tâches de rappel qui requièrent de stocker en mémoire de travail la chaîne de caractère perçue (Eichelman, 1970). Or les habilités en mémoire de travail ne sont pas totalement matures chez les apprenti-lecteurs (Cowan, 1997; Spencer, 2020), ce qui rendrait ces tâches particulièrement difficiles. Au contraire, la tâche LDT est une tâche de reconnaissance qui nécessite de vérifier la concordance de la chaîne perçue avec une représentation stockée en mémoire à long terme ; ce processus pouvant représenter un coût cognitif moins important que la tâche de rappel. Cette proposition se vérifie par une sensibilité plus forte dans la tâche LDT ( $d' = 2.31$ ) que dans les tâches TSI ( $d' = 1.06$ ) et SDM ( $d' = 1.65$ ). De manière intéressante, c'est dans ces deux dernières tâches que l'allongement de la durée de présentation produit la plus large amélioration de sensibilité ( $\Delta TSI = .56$ ,  $\Delta SDM = .64$ ,  $\Delta LDT = .36$ ). Ce résultat suggère que la manipulation de la durée de présentation peut s'avérer particulièrement adaptée lorsque les tâches impliquent un niveau élevé de contraintes (e.g., mémoire de travail).

---

<sup>17</sup> L'expérience a été initialement conçue pour explorer l'effet de l'allongement des durées de présentation de manière indépendante dans chacune des tâches expérimentales. Ce choix explique pourquoi des durées de présentation différentes ont été utilisées entre les tâches. Ces durées ont été choisies sur la base d'études antérieures. Les études ayant servi au choix des durées des tâches LDT et TSI utilisaient des plans transversaux chez l'apprenti-lecteur, alors que le choix des durées de la tâche SDM s'est appuyé sur des études utilisant des plans longitudinaux chez l'enfant pré-lecteur. Toutefois, notre étude révèle que les tâches TSI et SDM présentent une sensibilité équivalente pour des durées de présentations avoisinant 300 ms. Ce résultat suggère qu'un alignement des durées de présentation à travers les trois tâches aurait été possible et aurait permis de faciliter la comparaison inter-tâches.

Au-delà des contraintes inhérentes à la tâche, l'effet de la durée de présentation est également modulé par le niveau de lecture des participants : plus les participants avaient un niveau de lecture élevé, plus le bénéfice était important. Ce résultat peut apparaître opposé à l'objectif poursuivi. L'allongement de la durée de présentation est généralement justifié par la nécessité de faire performer les lecteurs les moins compétents (e.g., Snell et al., 2021). Or, ces enfants sont ceux qui bénéficient le moins de l'allongement de la durée de présentation. L'exploitation de cet apport d'information pourrait nécessiter d'accéder rapidement et automatiquement à l'identité des lettres. Cette caractéristique du traitement orthographique (García-Orza et al., 2010) se mettrait progressivement en place lors des premières années d'apprentissage et serait dépendante du niveau de connaissances des lettres de l'enfant (Maurer et al., 2005). Or, au début de l'apprentissage de la lecture, l'enfant utiliserait une stratégie de reconnaissance des lettres lente et sérielle (Grainger, Lété, et al., 2012) qui ne lui permettrait pas de bénéficier de l'augmentation des durées de présentation. La transition vers une stratégie de reconnaissance rapide et automatique s'effectuerait progressivement grâce à un désengagement progressif des zones pariéto-temporale au profit des zones occipitotemporales soutenant le traitement orthographique (Dehaene-Lambertz et al., 2018). Dans cette perspective, les variabilités inter-individuelles observées dans la capacité à exploiter les faibles variations de la durée de présentation<sup>18</sup> pourraient s'expliquer par les différences d'expertise orthographique. De manière intéressante, chez l'enfant pré-lecteur qui est incapable d'accéder rapidement et automatiquement à l'identité des lettres, un allongement conséquent de la durée de présentation ne lui permet pas de réussir au-dessus du niveau de la chance (Duñabeitia et al., 2015). En revanche, des adaptations de la procédure expérimentale permettant une réduction

---

<sup>18</sup> Par "faibles variations de la durée de présentation" nous entendons des durées de présentation qui sont susceptibles de contraindre l'enfant à engager des stratégies de traitement parallèle pour réussir la tâche considérée, par opposition à des durées de présentation dont l'étendue serait si large que l'enfant pourrait engager des stratégies de traitement plus délibérées.

des demandes cognitives (e.g., mémoire de travail, familiarité visuelle, modalité de réponse, etc.) permettent d'améliorer la performance (Perea et al., 2016). Cela suggère que l'adaptation des durées de présentation est adaptée chez l'apprenti-lecteur ayant développé des processus orthographiques rudimentaires, mais demeure insuffisante chez l'enfant pré-lecteur.

#### **2.1.4.2. Recommandations pour le choix des durées de présentation dans les futures études.**

Les résultats discutés ci-dessus permettent de formuler des premières recommandations pour le choix des durées de présentation dans des tâches orthographiques chez l'apprenti-lecteur. En premier lieu, la durée retenue doit assurer une sensibilité suffisante ( $d' > 1$ ). De plus, cette durée ne doit pas excéder la durée d'une fixation oculaire. En effet, si le participant est capable d'effectuer une seconde fixation pendant le traitement du stimulus, alors la nature parallèle du traitement (Grainger, 2018) ne peut être assurée. Chez l'apprenti-lecteur, cette durée de fixation évolue au cours de l'apprentissage de la lecture (voir Rayner, 1998). Cette évolution permettrait de justifier l'utilisation de durée de présentation différenciée en fonction du groupe scolaire (Snell et al., 2021). Cependant, ces durées de fixations ne sont que des durées de fixation moyenne. Par conséquent, elles ne reflètent pas les variabilités inter-individuelles qui peuvent exister au sein d'un même groupe scolaire. Pour un même groupe scolaire, certains enfants peuvent présenter des durées de fixations beaucoup plus courtes ou beaucoup plus longues. Ainsi, l'application d'une durée de présentation de manière uniforme à travers un même groupe scolaire pourrait conduire à ce que les enfants présentant les durées de fixation les plus courtes ne soient plus engagés dans un traitement purement parallèle, ce qui peut limiter l'interprétation des résultats obtenus. Afin d'éviter cet écueil, une solution serait de déterminer la durée de présentation en fonction du niveau de lecture qui est corrélée à la durée de fixation.

Pour déterminer le niveau de lecture permettant d'orienter le choix de durée de présentation différenciées, une analyse de classification a été réalisée. Cette analyse a permis

d'identifier deux profils de performances orthographiques qui différaient sur leur sensibilité aux trois tâches orthographiques. La lecture de la Figure 24 révèle que l'appartenance à un profil particulier était particulièrement bien expliquée par le niveau de lecture : 81% des participants ayant un score CTL inférieur à 272 appartenait au profil de Faible Performance Orthographique (FPO), et 81% des participants ayant un score CTL supérieur à 272 appartenait au profil de Haute Performance Orthographique (HPO). De manière intéressante, ce score est très proche du niveau de lecture moyen attendu en 5<sup>ème</sup> année ( $M = 268$ ,  $SD = 82$ ; Lefavrais, 2005). En considérant que la difficulté à réaliser une tâche orthographique doit motiver un allongement de la durée de la présentation alors celui-ci devrait être appliqué aux enfants qui n'ont pas atteint le niveau de lecture attendu en 5<sup>ème</sup> année. Ce résultat est en adéquation avec les pratiques actuelles consistant à utiliser des temps de présentation plus longs que chez l'adulte lors de l'investigation des processus orthographiques chez l'apprenti lecteur.

Pour déterminer la valeur optimale de la durée de présentation en fonction du profil d'expertise orthographique, des analyses restreintes aux clusters FPO et HPO ont été réalisées (voir Matériel Supplémentaire). Le Tableau 4, reporte la première durée de présentation pour laquelle une valeur de sensibilité supérieure à 1 est atteinte en fonction de la tâche et du profil orthographique considéré. La durée de présentation identifiée pour la tâche LDT est équivalente pour les deux profils de performance orthographique (145 ms). En revanche, la durée de présentation identifiée pour les tâches SDM et TSI diffère selon les profils. En particulier, les durées de présentation associées au profil FPO pour les tâches SDM et TSI sont largement supérieures à la durée moyenne de fixation pour un enfant de 1<sup>ère</sup> année (environ 300 ms, pour une revue voir Rayner, 1998). Ainsi, en choisissant des durées qui permettent d'avoir une sensibilité satisfaisante dans ces tâches ( $d' > 1$ ), les chercheurs prendraient le risque que l'enfant ne soit plus engagé dans un traitement parallèle des chaînes de lettres. Par conséquent, l'adaptation des durées de présentation dans les tâches TSI et SDM en vue d'aider l'enfant à

performer ne semble pas être une solution appropriée dans le cadre de l'investigation du traitement orthographique. Comme évoqué plus, les adaptations de la procédure expérimentale visant à réduire les demandes de la tâche pourrait s'avérer plus appropriées pour les individus du profil FPO. Toutefois, cette possibilité nécessite un examen empirique plus spécifique.

*Tableau 4. Valeur de la première durée de présentation (en ms) pour laquelle l'index de sensibilité atteint la valeur de 1 en fonction de la tâche et du cluster de performance orthographique. L'index de sensibilité associé à la durée de présentation est indiqué entre parenthèses. Pour le cluster de Faible Performance Orthographique, aucune durée de présentation ne permettait d'atteindre un index de sensibilité moyen égal à 1 (max = .68 pour 483 ms).*

| <b>Cluster</b> | <b>TSI</b>       | <b>SDM</b>       | <b>LDT</b>       |
|----------------|------------------|------------------|------------------|
| <b>HPO</b>     | 150 ms<br>(1.34) | 300 ms<br>(2.13) | 150 ms<br>(3.06) |
| <b>FPO</b>     | ∅                | 900 ms<br>(1.11) | 150 ms<br>(1.36) |

### **2.1.5. Conclusion**

La présente étude visait à étudier l'impact de l'allongement de la durée de présentation sur la sensibilité de trois tâches orthographiques chez l'apprenti-lecteur. Les résultats ont révélé que l'allongement de la durée de présentation permettait d'augmenter la sensibilité mais que cette augmentation était modulée par les contraintes de la tâche et le niveau de lecture des participants. Bien que les moins bons lecteurs parviennent à tirer un bénéfice de l'allongement des durées de présentation, cet allongement est trop important pour permettre de maintenir les enfants dans une stratégie de traitement parallèle nécessaire à l'investigation du traitement orthographique. Les adaptations des procédures expérimentales visant à réduire les demandes de la tâche apparaissent comme une alternative crédible qui devra faire l'objet d'un examen empirique spécifique.

## **2.2.Étude 2. Étude des relations d'interdépendance fonctionnelle des mécanismes orthographique chez l'enfant de 6<sup>ème</sup> année.**

### ***2.2.1. Objectifs***

Sur la base de l'architecture proposée par Grainger et al. (2016), Grainger (2018) identifie trois mécanismes clés soutenant l'efficacité des processus orthographiques : (1) l'encodage de la position et de l'identité des lettres dans un code spécifique à l'emplacement (appelé mécanisme d'Encodage Position-Spécifique, EPS), (2) la transformation de ce code en un code invariant à l'emplacement (appelé mécanisme d'Encodage Position-Invariant, EPI), et (3) la capacité à mettre en œuvre ces deux mécanismes pour encoder l'information orthographique à travers plusieurs mots en parallèle (appelé mécanisme d'Intégration Spatiale, IS). Ainsi définis, ces mécanismes entretiennent des liens d'interdépendance fonctionnelle, puisque le mécanisme EPI nécessite la mise en œuvre du mécanisme EPS, alors que la mise en œuvre du mécanisme IS nécessite la mise en œuvre des mécanismes EPS et EPI. Toutefois, l'action de ces mécanismes a été étudiée de manière relativement indépendante par la littérature, à travers l'utilisation de tâches spécifiques à chaque mécanisme, tâches censées engager préférentiellement les traitements associés aux mécanismes considérés.

Le mécanisme EPS est traditionnellement étudié à travers une tâche d'identification de cible dans une chaîne de caractère (*Target-in-String Identification task*, ci-après tâche TSI). Inspirée des travaux de Reicher (1969) et Wheeler (1970), cette tâche consiste à présenter brièvement une chaîne de caractères (généralement cinq) pendant que le participant fixe le centre de l'écran. La chaîne de caractères est ensuite remplacée par un masque et l'une des cinq positions est signalée. Le participant doit alors reporter le caractère signalé. Le résultat majeur obtenu dans cette tâche est que les adultes normo-lecteurs rappellent plus facilement la lettre centrale ainsi que les lettres en position externe (Tydgate & Grainger, 2009). Cet avantage pour les lettres externes, et en particulier pour la première position, émergerait progressivement au

cours de l'apprentissage de lecture, et ne serait observé que pour les chaînes de lettres (Grainger, Dufau, et al., 2016). De ce fait, Tydgate et Grainger (2009) propose que le mécanisme EPS soit implémenté par des détecteurs de lettres dont les champs récepteurs seraient progressivement modifiés au cours de l'apprentissage de la lecture afin de favoriser le traitement de certaines positions de la chaîne de lettres, en particulier la première position. Selon Grainger et al. (2016), ces détecteurs de lettres constituent la première étape d'encodage orthographique et permettent au système orthographique de disposer d'une information sur l'identité et la position des lettres relativement au référentiel rétinotopique. Dans une seconde étape de traitement, ce code doit être transformé par le mécanisme EPI afin de ne plus dépendre du référentiel rétinotopique.

Ce mécanisme EPI est traditionnellement étudié à travers une tâche de jugement perceptif (*Same-Different Matching task*, ci-après tâche SDM). Inspirée des travaux de Krueger (1978) et Ratcliff (1981), cette tâche consiste à présenter brièvement une chaîne de caractères pendant que le participant fixe le centre de l'écran. Cette chaîne est ensuite remplacée par une seconde chaîne de même longueur. Le participant doit alors décider si les deux chaînes de caractères étaient identiques ou non. Le résultat majeur obtenu dans cette tâche est que la discrimination de chaîne de lettres transposées (e.g., RZXT-RXZT) induit un coût plus important que celle de chaîne de lettres substituées (e.g., RZXT-RQBT) (Duñabeitia et al., 2012; Massol et al., 2013). Le coût de transposition pour les chaînes de lettres augmenterait progressivement relativement à celui des chaînes de chiffres au cours de l'apprentissage de la lecture (Duñabeitia et al., 2015). Ce résultat témoignerait de la flexibilité de l'encodage de la position des lettres opéré par le mécanisme EPI. Cet encodage a fait l'objet de plusieurs caractérisations théoriques au cours des dernières décennies (Castles et al., 2007; Gomez et al., 2008; Grainger & van Heuven, 2003; Norris, 2006) et serait un préalable à l'activation de la représentation orthographique du mot écrit. Dans le cadre de l'architecture proposée par Grainger et al. (2016), ce mécanisme EPI agirait en parallèle sur le mot fixé et les mots



environnants afin d'encoder l'information sur la position et l'identité de leurs lettres à travers le mécanisme IS.

Ce mécanisme IS est traditionnellement étudié à travers une tâche de décision lexicale à lettres flanquées (*Flanking Letters Lexical Decision Task*, ci-après tâche FLLD). Inspirée des travaux d'Eriksen (1995), puis de ceux de Dare & Shillcock (2013), cette tâche consiste à présenter un mot entouré à gauche et à droite de deux autres chaînes de lettres appelés flanqueurs. Le participant doit déterminer si le mot central est un mot valide ou non. Le résultat majeur obtenu dans cette tâche est que les temps de décision lexicale sont plus rapides lorsque le mot cible est entouré de flanqueurs reliés orthographiquement (e.g., ro rock ck) que lorsqu'il est entouré de flanqueurs non-reliés (e.g. st rock ep). Cet effet s'expliquerait par la capacité à exploiter l'information sur l'identité et la position des lettres contenues dans les flanqueurs afin de générer une vague d'activation vers la représentation orthographique du mot cible. Cette capacité serait présente dès la fin de la première année d'apprentissage et ne serait pas modulée par le niveau de lecture (Snell et al., 2021).

Les trois mécanismes ainsi définis sont associés à trois tâches expérimentales et trois marqueurs comportementaux clairement établis. L'objectif de cette étude était d'administrer ces trois tâches à un large échantillon d'enfants lors de leur 6<sup>ème</sup> année d'apprentissage. L'investigation des processus orthographiques au sein d'un même groupe d'âge permet d'éviter l'effet de variables confondues liées aux aspects développementaux. En particulier, l'intelligence générale et les compétences en lecture sont fortement liées lors des premières années d'apprentissage et se dissocient à partir de la première année d'apprentissage (Ferrer et al., 2009). L'étude des processus orthographiques lors de 6<sup>ème</sup> année d'apprentissage permet également d'assurer une bonne représentativité des résultats obtenus puisque 100% des enfants sont scolarisés à cet âge (i.e., 11 ans), alors que seuls 56.6% des adultes de 20 ans sont encore scolarisés (Insee, n.d.). Ces deux populations se distinguent également par l'hétérogénéité de

leurs niveaux de lecture, les enfants de 6<sup>ème</sup> année présentant des variations de niveau de lecture plus importantes que les étudiants de 20 ans à l'université. Enfin, les trois mécanismes orthographiques considérés sont supposés être opérationnels chez ces collégiens.

L'administration des tâches TSI, SDM et FLLD devait permettre d'étudier la modulation par le niveau de lecture des effets d'avantage de la première lettre, de transposition de lettre, et d'intégration spatiale. Puis, en considérant que les tâches TSI, SDM, et FLLD permettent à l'enfant d'engager préférentiellement l'un des mécanismes orthographiques précité (respectivement EPS, EPI et IS), alors la performance réalisée à ces tâches est supposée refléter l'efficacité de ces mécanismes. Ainsi, la performance moyenne des participants pour chacune des tâches a été calculée afin d'explorer les relations inter-tâches et de préciser les hypothèses relatives à l'interdépendance fonctionnelle des mécanismes EPS, EPI, et IS.

### ***2.2.2. Méthode***

#### **2.2.2.1. Participants**

Cent-soixante-et-un enfants issus de collèges de Lyon (France) ont été testés en milieu d'année scolaire. Les enfants ont réalisé les trois tâches orthographiques (TSI, SDM et FLLD). Leur niveau d'efficacité en lecture a été évalué à l'aide du test *L'Alouette* (Lefavrais, 2005). Tous les enfants étaient de langue maternelle française et avaient une vision normale ou corrigée à la normale. Un consentement éclairé a été fourni par les parents de chaque enfant avant l'expérimentation. L'étude a été approuvée par le comité d'éthique du Comité de protection des personnes SUD-EST IV (n°17/051) et a été réalisée conformément aux directives et règlements inhérents à la Déclaration d'Helsinki.

## **2.2.2.2. Tâche d'identification de caractère dans une chaîne (TSI).**

### **2.2.2.2.1. *Stimuli et design expérimental***

Neuf consonnes majuscules (B, D, G, K, H, N, S, R) utilisées dans l'étude de (Grainger, Dufau, et al., 2016) et un ensemble additionnel de neuf consonnes majuscules (C, F, J, L, P, Q, T, V, X) ont permis de générer 180 chaînes de cinq consonnes différentes. L'utilisation de l'ensemble additionnel de consonnes avait pour objectif d'augmenter la puissance statistique de l'étude. Chaque chaîne contenait une consonne cible qui pouvait se trouver à une des cinq positions, ce qui définissait le facteur position à cinq modalités. Pour chaque participant, chacune des 18 consonnes était utilisée 10 fois comme cible, deux fois à chacune des positions, donnant un total de 180 essais.

### **2.2.2.2.2. *Procédure***

La procédure expérimentale était similaire à celle employée par Grainger et al. (2016). Chaque essai commençait par une croix de fixation au centre de l'écran pendant 1000 ms. Puis, le stimulus (la chaîne de cinq consonnes) était affiché pendant 300 ms avant d'être remplacé par un masque composé de cinq dièses. Simultanément à la présentation de ce masque, la consonne cible était signalée par l'ajout de deux barres horizontales au-dessus et en-dessous de la position de la cible. Après 500 ms, deux réponses alternatives, l'une correspondant à la consonne cible, l'autre à une consonne alternative, étaient présentées au-dessus et en-dessous de la position signalée. La consonne cible était présentée au-dessus du masque dans la moitié des essais et en-dessous du masque dans l'autre moitié des essais. Le masque, les barres horizontales, et les réponses alternatives restaient visibles pendant 3000 ms ou jusqu'à la réponse des participants qui devaient sélectionner la consonne qui se trouvait dans la chaîne à la position signalée (procédure dite 2AFC, *Two alternative Force Choice procedure*). La consonne alternative utilisée pour le choix forcé était toujours une consonne qui se trouvait à

une position voisine de la consonne cible dans la chaîne : soit à la droite de la consonne cible (50% des essais pour les positions 2, 3 et 4 ; 100% des essais pour la position 1 ; jamais pour la position 5), soit à gauche de la consonne cible (50% des essais pour les positions 2, 3, et 4 ; 100% des essais pour la position 5 ; jamais pour la position 1). Les participants devaient répondre le plus précisément et le plus rapidement possible en appuyant sur la touche "flèche haut" du clavier pour la réponse se trouvant au-dessus de la chaîne, et sur la touche "flèche bas" du clavier pour la réponse se trouvant en-dessous de la chaîne. Une fois la réponse donnée, un écran vide était affiché pendant 500 ms avant qu'un nouvel essai commence. Les stimuli étaient présentés en police Courier New de couleur noire et de taille 12 pt sur un fond gris à une distance d'environ 60 cm. Une courte session d'entraînement de 24 essais était proposée aux enfants avant le début de l'expérience afin que ces derniers se familiarisent avec la tâche. L'expérience principale était composée de 180 essais présentés de manière aléatoire. Une pause était possible tous les 30 essais. La durée totale de la tâche était d'environ 10 min. La procédure expérimentale est illustrée dans la Figure 25.

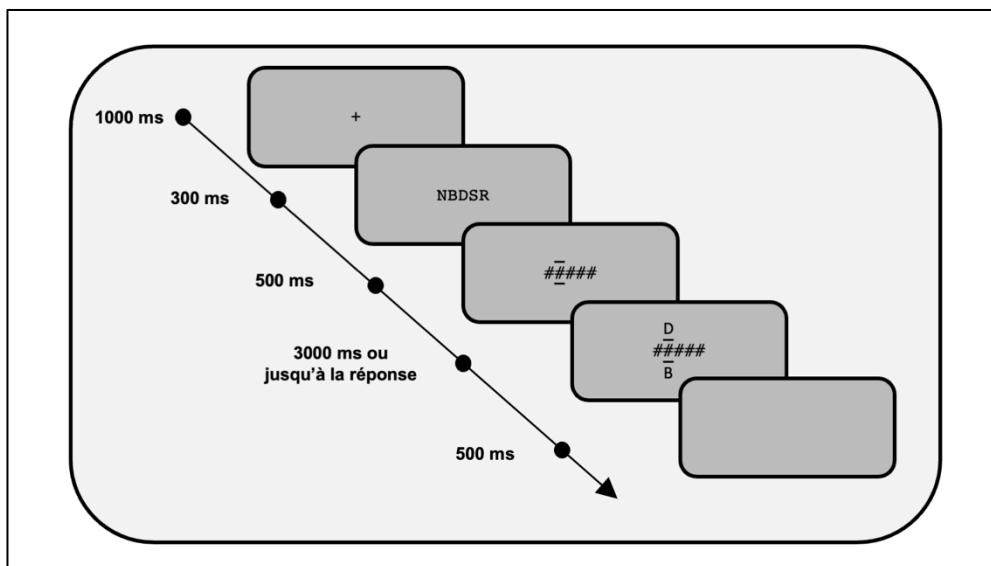


Figure 25. Illustration de la procédure expérimentale d'un essai de la tâche d'identification de caractère dans une cible (TSI)

### **2.2.2.3. Tâche de jugement perceptuel (SDM)**

#### **2.2.2.3.1. *Stimuli et design expérimental***

Soixante chaînes de 4 consonnes ont été sélectionnées dans le matériel utilisé par Duñabeitia et al. (2014). Ces chaînes étaient composées des consonnes K, G, L, N, B, D, S. Pour les besoins de la tâche, chaque chaîne était associée à une chaîne identique (e.g., BDFL-BDFL), à une chaîne transposée obtenue par la transposition des consonnes internes (e.g., BDFL-BFDL) et à une chaîne substituée obtenue par la substitution des consonnes internes (e.g., BDFL-BGSL). Deux listes ont été construites de sorte que chaque participant ne voit chaque chaîne que dans une seule des conditions dissimilaires, c'est-à-dire soit la condition transposée, soit la condition substituée. Ainsi l'expérience contenait 120 essais (60 identiques, 30 transposés, 30 substitués).

#### **2.2.2.3.2. *Procédure***

Chaque essai expérimental commençait par la présentation d'une croix de fixation au centre de l'écran pendant 1000 ms. La chaîne de référence était alors présentée horizontalement au-dessus du centre de l'écran pendant 300 ms. Puis, la chaîne cible était présentée horizontalement en-dessus du centre de l'écran pendant 3000 ms ou jusqu'à la réponse du participant. Les participants devaient appuyer le plus rapidement et le plus justement possible sur la touche "M" du clavier si les chaînes étaient identiques et sur la touche "Q" dans le cas contraire (et *vice versa* pour les participants gauchers). Une fois la réponse donnée, un écran vide était présenté pendant une durée de 500 ms avant le début de l'essai suivant. Les essais étaient divisés en cinq blocs de 24 items. Pour éviter des effets de fatigue, une pause était possible entre chaque bloc. Les stimuli étaient présentés sur un fond gris en police Courier New de couleur noire et de taille 12pt. La durée totale de la tâche était d'environ 10 min. La procédure expérimentale est illustrée dans la Figure 26.

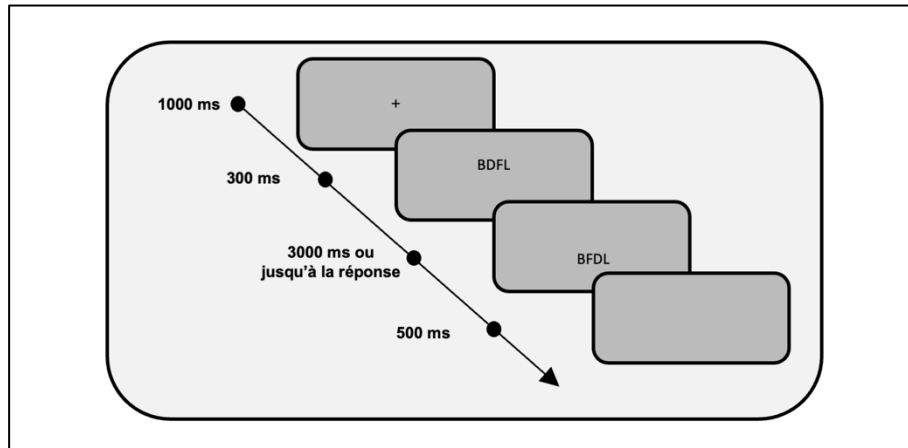


Figure 26. Illustration de la procédure expérimentale d'un essai de la tâche de jugement perceptuel (SDM)

#### 2.2.2.4. Tâche de décision lexicale à lettres flanquées (FLLD)

##### 2.2.2.4.1. Stimuli et design expérimental

Soixante-quinze paires de mots ont été sélectionnées parmi celles utilisées par Snell et al., (2021). Les paires de mots sélectionnées ont été obtenues à partir de la base de données Manulex (Lété et al., 2004). Tous les mots étaient composés de quatre lettres et étaient classifiés Grade 1 dans Manulex (i.e., ces mots étaient régulièrement rencontrés par les lecteurs débutants) et ne contenaient pas de caractères diacritiques. La fréquence moyenne de ces mots était de  $2.18 \log_{10}$  partie par million (ppm – range 1.2-3.9  $\log_{10}$  ppm). Les mots sélectionnés étaient des verbes, des adjectifs, des participes, des pronoms, des adverbes et des auxiliaires. Aucun des mots au sein des paires de mots n'était orthographiquement ou sémantiquement relié, de sorte que ces paires étaient utilisées pour générer le mot cible et les flanqueurs (e.g., fo arme in). Soixante-quinze paires de pseudomots ont également été sélectionnées parmi celles utilisées par Snell et al. (2021) pour les besoins de la tâche de décision lexicale. Trois types de flanqueurs, similaires à ceux de l'étude de Grainger et al. (2014) ont été utilisés : (1) des flanqueurs reliés orthographiquement et dont l'ordre était préservé (condition Flanqueurs Reliés, e.g., ar arme me), (2) des flanqueurs reliés orthographiquement et dont l'ordre était inversé (condition Flanqueurs Inversés, e.g., me arme ar), (3) des flanqueurs non reliés

orthographiquement (condition Flanqueurs Non Reliés, e.g., fo arme in). Par ailleurs, aucune cible ne pouvait former un nouveau mot lorsqu'elle était combinée avec l'un de ses flanqueurs (gauche ou droite). Un design en carré latin a été utilisé pour que tous les items (i.e., les mots et les pseudomots) soient vus dans toutes les conditions, mais une seule fois par participant. L'ordre de présentation des stimuli était aléatoirisé à travers les participants.

#### 2.2.2.4.2. Procédure

Chaque essai expérimental commençait par la présentation d'une croix de fixation au centre de l'écran pendant 1000 ms. La cible et les flankers étaient ensuite présentés simultanément pendant 250 ms, avant d'être remplacé par un écran vide pendant 3000 ms ou jusqu'à la réponse du participant. Le participant devait appuyer sur la touche "M" si la cible était un mot ou sur la touche "Q" dans le cas contraire (et *vice versa* pour les participants gauchers). Une fois la réponse donnée, un écran vide était présenté pendant une durée de 500 ms avant le début de l'essai suivant. Les essais étaient divisés en 5 blocs de 30 items. Pour éviter des effets de fatigue, une pause était possible entre chaque bloc. Les stimuli étaient présentés sur un fond gris en police Courier New de couleur noire et de taille 12pt. La durée totale de la tâche était d'environ 10 min. La procédure expérimentale est illustrée dans la Figure 27.

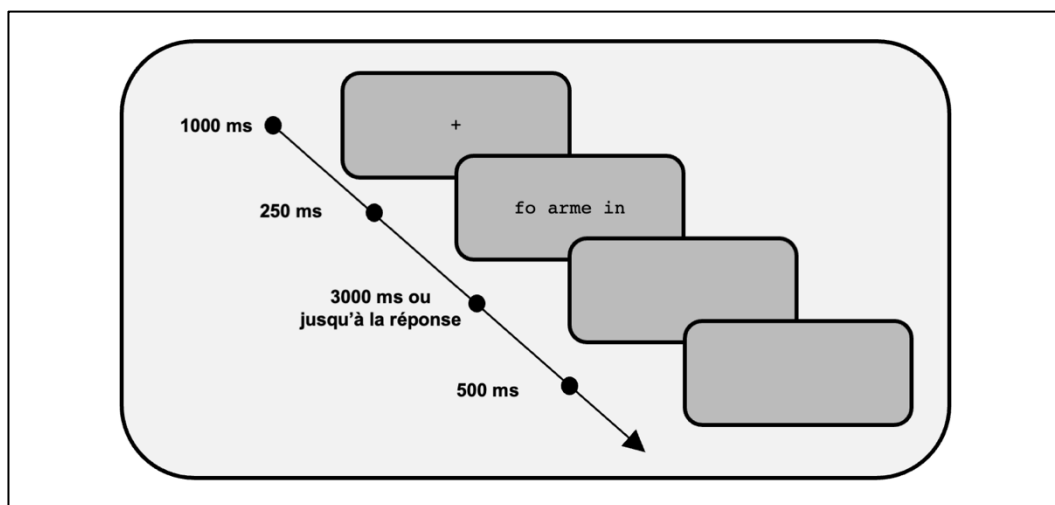


Figure 27. Illustration de la procédure expérimentale d'un essai de la tâche de décision lexicale à lettres flanquées (FLLD)

### **2.2.3. Résultats**

Les données brutes ont été traitées à l'aide du logiciel R (R Core Team, 2020). Au total 161 enfants de 6<sup>ème</sup> année ont été inclus dans les analyses. La matrice de données finale contenait 14490 observations pour la tâche TSI, 19320 observations pour la tâche SDM et 24150 pour la tâche FLLD. L'analyse des données a été réalisée en deux étapes.

- Premièrement, les effets expérimentaux spécifiques à chaque tâche ont été analysés de manière individuelle. Les analyses utilisées étaient analogues à celles utilisées dans les études antérieures : les participants n'atteignant pas le seuil de la chance ont été retirés des analyses, puis des modèles mixtes ont été réalisés. Cette première étape visait à s'assurer que la signature empirique des mécanismes orthographiques considérés était bien présente.
- Deuxièmement, la performance globale des participants à chaque tâche a été calculée pour les deux variables dépendantes considérées : les taux de précision et les temps de réponses. Ces mesures devaient permettre d'estimer le niveau d'efficacité du mécanisme orthographique (EPS, EPI, IS) engagé pour réaliser la tâche considérée (TSI, SDM, FLLD, respectivement). Sur cette base, une analyse de corrélation a été réalisée pour examiner les relations d'efficacité entre les tâches. L'ensemble des participants ont été conservés pour cette analyse.

#### **2.2.3.1. Analyse des effets expérimentaux**

Les effets expérimentaux spécifiques à chaque tâche ont été analysés à l'aide de modèles mixtes linéaires (*lme4* package in R; Bates et al., 2015). Pour normaliser les distributions, les temps de réaction (TR) ont été transformés selon la relation suivante :  $-1000/TR$ . Un modèle mixte linéaire a été sélectionné pour chaque tâche. Il comprenait le facteur fixe Niveau de lecture en variable continue et le facteur fixe d'intérêt de chaque tâche : TSI : variable Position à 5 modalités, P1 à P5 ; SDM : variable Type de manipulation à 2 modalités, 2 lettres



transposées vs 2 lettres substituées ; FLLD : variable Type de flanqueur à 3 modalités, bigrammes reliés vs inversés vs non reliés. Pour chaque modèle, la structure aléatoire du modèle a été maximisée dans la mesure où cette solution convergeait. Nous avons testé les effets globaux à l'aide de la somme des carrés de Type III et de tests de  $\chi^2$ . Les contrastes post-hoc ont été calculés en utilisant le package R *emmeans* (Lenth, 2023). Les résultats complets des modèles sont présentés dans le [matériel supplémentaire en ligne](#).

#### **2.2.3.1.1. Tâche d'identification de caractères dans une chaîne. (TSI).**

Vingt-neuf participants dont la performance globale était inférieure à 55% de bonnes réponses ont été exclus des analyses. La matrice de données finale comprenait 11880 observations. Les réponses incorrectes (32.16%) et les réponses correctes avec des TR inférieurs à 300 ms (0.96%) ont été retirées des analyses. Puis, les essais associés à des valeurs extrêmes, définies par des TR supérieurs ou inférieurs à 2.5 SD de la moyenne des TR du participant ont été exclus (2.82% des réponses correctes).

L'analyse des TR a révélé un effet principal significatif de la Position ( $\chi^2 = 96.49$ ,  $p < .001$ ) montrant que P1 et P3 étaient traitées plus rapidement que P2 et P5, P4 étant la position significativement plus lente que toutes les autres positions (cf. Figure 28.A et Tableau 5 pour les contrastes post-hoc). Par ailleurs, l'effet principal du Niveau de lecture n'était pas significatif ( $\chi^2 = 0.91$ ,  $p = .34$ ). Cependant, l'effet d'interaction entre la Position et le Niveau de lecture était significatif ( $\chi^2 = 14.09$ ,  $p < .01$ ). La Figure 28.B révèle que l'accroissement du niveau de lecture s'accompagne d'une diminution des TR pour P1, P2, et P3, alors que pour P4 et P5, les TR restent relativement stables.

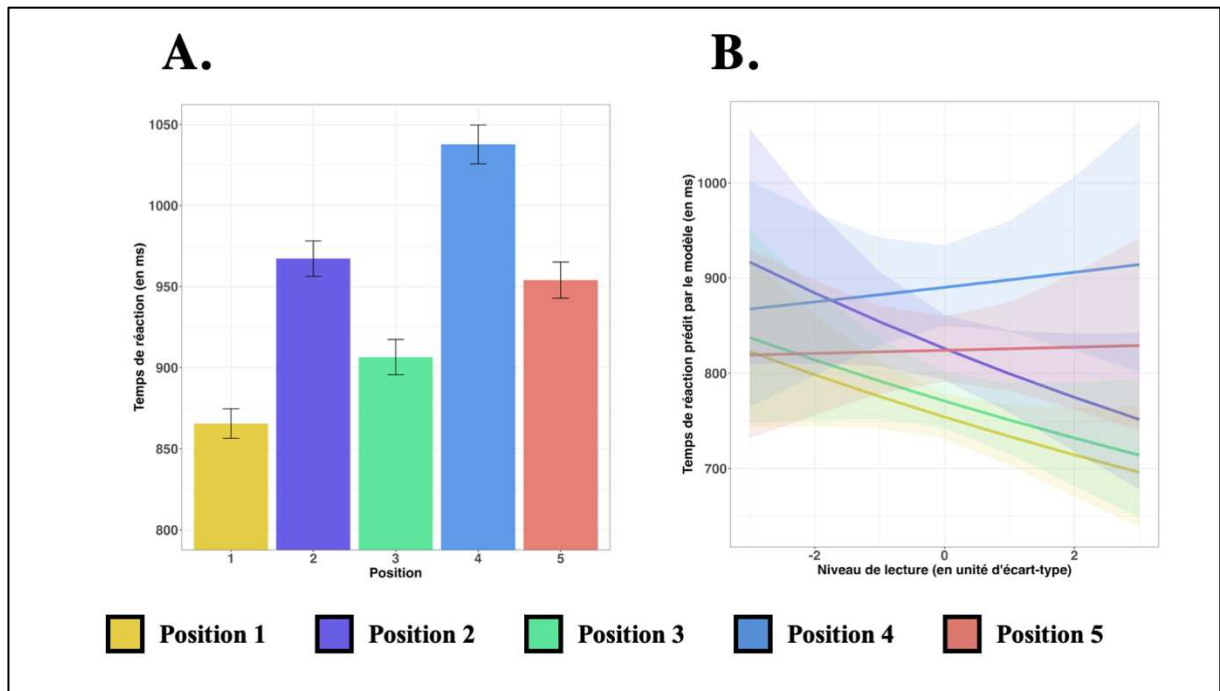


Figure 28. (A) Temps de réaction pour les lettres correctement identifiées en fonction de la position. (B) Temps de réaction pour les caractères correctement identifiés en fonction de la position et du niveau de lecture (en unité d'écart-type).

Tableau 5. Tests post-hoc réalisés avec le package emmeans pour chaque contraste de position.

| Contrastes | $ \Delta $ (en ms) | $ z $ | $p$   |
|------------|--------------------|-------|-------|
| P1 – P2    | 101                | 4.97  | <.001 |
| P1 – P3    | 41                 | 1.11  | .80   |
| P1 – P4    | 172                | 8.23  | <.001 |
| P1 – P5    | 88                 | 4.83  | <.001 |
| P2 – P3    | 60                 | 3.77  | <.01  |
| P2 – P4    | 71                 | 3.80  | <.01  |
| P2 – P5    | 13                 | .05   | 1     |
| P3 – P4    | 131                | 7.57  | <.001 |
| P3 – P5    | 47                 | 3.51  | <.01  |
| P4 – P5    | 84                 | 3.87  | <.01  |

### 2.2.3.1.2. Tâche de jugement perceptuel (SDM)

Seules les données sur les essais différents ont été analysées. Deux participants dont la performance globale était inférieure à 55% ont été exclus des analyses. La matrice de données finale comprenait 19080 observations. Les réponses incorrectes (11.34%) et les réponses correctes avec des TR inférieurs à 300 ms (0.22%) ont été retirées des analyses. Puis, les essais

associés à des valeurs extrêmes, définies par des TR supérieurs ou inférieurs à 2.5 SD de la moyenne des TR du participant ont été exclus (2.90% des réponses correctes).

L'analyse des TR a révélé un effet principal significatif du Type de manipulation (cf. Figure 29.A) montrant que la condition substituée était plus rapide que la condition transposée ( $\chi^2 = 132.64, t = 11.52, p < .001$ ) et un effet principal du Niveau de lecture ( $\chi^2 = 3.81, p = .05$ ). L'effet d'interaction entre le Type de manipulation et le Niveau de lecture était également significatif ( $\chi^2 = 4.01, p < .05$ ), l'effet de transposition augmentant avec le niveau de lecture à *L'Alouette* (cf. Figure 29.B).

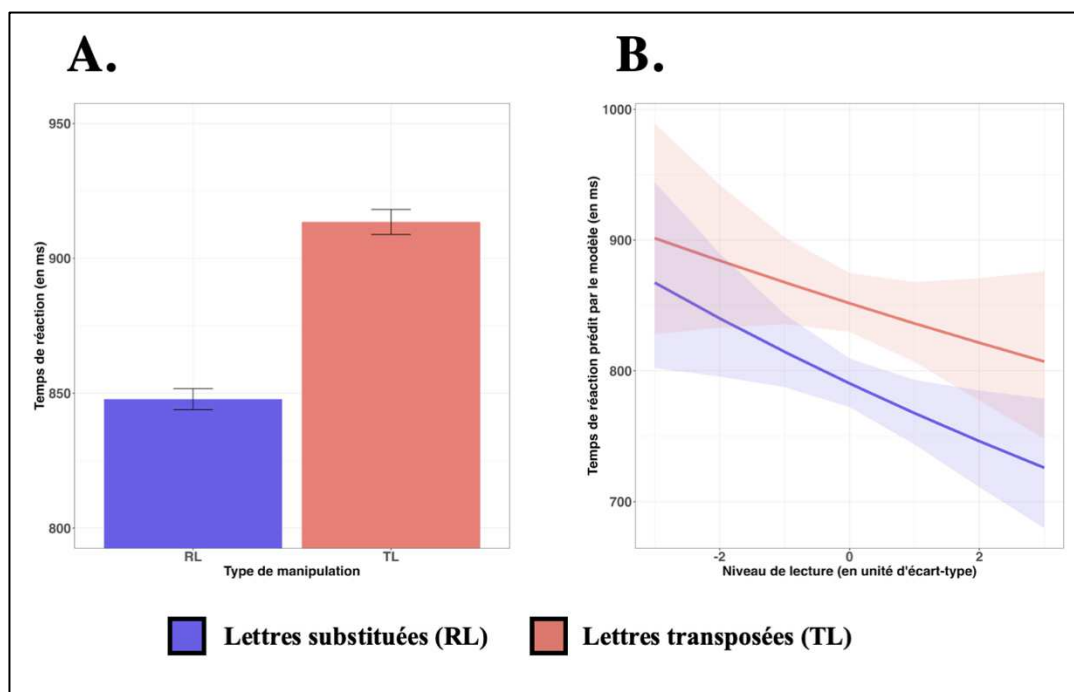


Figure 29. (A) Temps de réaction dans la condition substituée (RL) et la condition transposée (TL). (B) Temps de réaction dans la condition substituée (RL) et dans la condition transposée (TL) en fonction du niveau de lecture (en unité d'écart-type).

### 2.2.3.1.3. Tâche de décision lexicale à lettres flanquées (FLLD)

Seules les données sur les mots ont été analysées. La matrice de données finale comprenait 24150 observations. Les réponses incorrectes (10.96%) et les réponses correctes avec des TR inférieurs à 300 ms (6.67%) ont été retirées des analyses. Puis, les essais associés à des valeurs extrêmes, définies par des TR supérieurs ou inférieurs à 2.5 SD de la moyenne des TR du participant ont été exclus (2.90% des réponses correctes).

L'analyse des TR a révélé un effet principal significatif du Type de flanqueur ( $\chi^2 = 146.26, p < .001$ ) : les TR étaient plus rapides dans les conditions Flanqueurs Répétés et Flanqueurs Inversés que dans la condition Flanqueurs Non Reliés (REP vs. NR :  $\Delta RT = 40$  ms,  $z = 11.74, p < .001$  ; INV vs. NR :  $\Delta RT = 22$  ms,  $z = 8.35, p < .001$ ). Les TR étaient également plus rapides dans la condition Flanqueurs Répétés que dans la condition flanqueurs Inversés ( $\Delta RT = 18$  ms,  $z = 3.40, p < .01$ ). Par ailleurs, un effet principal du Niveau de lecture a été observé, montrant que les meilleurs lecteurs présentaient des TR plus rapides ( $\chi^2 = 27.28, p < .001$ ). En revanche, l'effet d'interaction entre le Type de flanqueur et le Niveau de lecture n'était pas significatif ( $\chi^2 = 1.50, p = .47$ ). La Figure 30 illustre ces résultats.

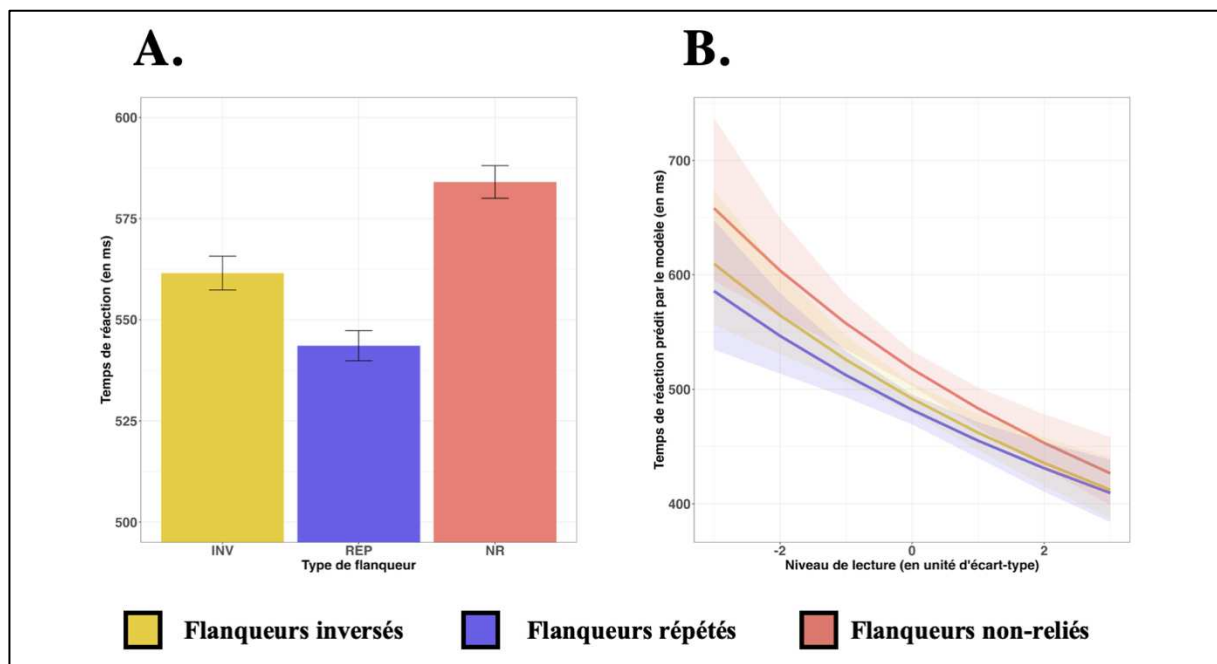


Figure 30. (A) Temps de réaction dans les conditions inversée (INV), répétition (REP) et non-relieuses (NR). (B) Temps de réaction dans les conditions inversée (INV), répétition (REP) et non-relieuses (NR) en fonction du niveau de lecture (en unité d'écart-type).

### 2.2.3.2. Analyses de corrélations pour l'étude des relations inter-tâches

La matrice de données utilisées pour analyser les relations inter-tâches comprenait 57960 observations : 14490 pour la tâche TSI, 19320 pour la tâche SDM, et 24150 pour la tâche FLLD. Dans un premier temps, la performance globale de chaque participant dans chaque tâche a été calculée. Ce score a ensuite été standardisé afin de calculer les coefficients de corrélation

de Pearson à l'aide du package R *Hmisc* (Frank & Harrell, 2022). Les résultats ont révélé des corrélations significatives entre les tâches TSI et SDM d'une part ( $r(TSI, SDM) = .26, p < .001$ ), et entre les tâches SDM et FLLD d'autre part ( $r(SDM, FLLD) = .23, p < .001$ ). En revanche, la corrélation entre les tâches TSI et FLLD n'était pas significative ( $r(TSI, FLLD) = .11, p = .15$ ). La Figure 31.A illustre ces corrélations.

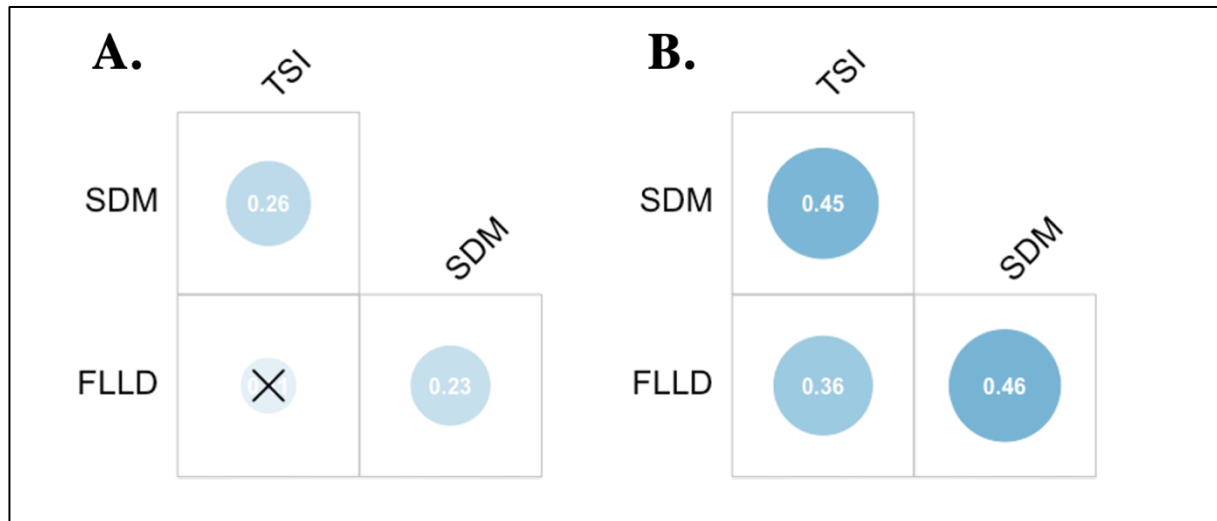


Figure 31. (A) Corrélations de Pearson sur les taux de précision standardisés par participant et par tâche (la corrélation entre la tâche FLLD et la tâche TSI, marquée par une croix, n'était pas significative :  $p = .15$ ). (B) Corrélations de Pearson sur les temps de réaction standardisés par participant et par tâche.

Dans un deuxième temps, le TR moyen par participant a été calculé dans chacune des tâches sur les réponses de type "oui" (TSI : lettre correctement identifiée à la bonne position ; SDM : réponse de type "identique" ; FLLD : réponse de type "mot"). En amont de l'analyse, les réponses incorrectes (TSI : 35.69%, SDM : 9.27%, FLLD : 9.33%) et les réponses correctes associées à des TR inférieurs à 300 ms (TSI : 1.46%, SDM : 0.23%, FLLD : 9.44%) ont été retirées. Puis, les essais associés à des valeurs extrêmes, définies par des TR supérieurs ou inférieurs à 2.5 SD de la moyenne des TR du participant ont été exclus (TSI : 2.77%, SDM : 3.05%, FLLD : 3.09%). Le temps de réaction moyen par tâche et par participant a ensuite été calculé. Ces valeurs ont ensuite été standardisées afin de calculer les coefficients de corrélation de Pearson. Les résultats ont révélé que les corrélations entre les tâches TSI et SDM ( $r(TSI, SDM) = .45, p < .001$ ), et entre les tâches SDM et FLLD ( $r(SDM, FLLD) = .46, p < .001$ ) étaient

plus élevées que la corrélation entre les tâches TSI et FLLD ( $r(TSI, FLLD) = .36, p < .001$ ), bien que cette différence ne soit pas significative ( $r(TSI, SDM) = .45$  vs.  $r(TSI, FLLD) = .36, p = .20$ ;  $r(SDM, FLLD) = .46$  vs.  $r(TSI, FLLD) = .36, p = .18$ ). La Figure 31.B illustre ces corrélations.

#### **2.2.4. Discussion**

L'objectif de cette étude était d'examiner comment les mécanismes orthographiques EPS, EPI et IS étaient affectés par le niveau de lecture et de caractériser leurs relations d'interdépendance fonctionnelle. Dans ce but, un large échantillon d'enfants en sixième année a été soumis à trois tâches (TSI, SDM et FLLD), chacune supposée engager spécifiquement l'un des mécanismes considérés (EPS, EPI et IS, respectivement). Les résultats obtenus dans chaque tâche sont cohérents avec les données de la littérature existante.

##### **2.2.4.1. Analyse de la signature empirique obtenue pour chacun des mécanismes considérés.**

Premièrement, les résultats de la tâche TSI indiquent un avantage net pour le traitement des positions 1, 3 et 5, qui nécessitent des temps de traitement plus courts que les positions 2 et 4. Ce résultat est cohérent avec la fonction sérielle de position en M généralement observée lors de l'analyse des temps de réaction dans cette tâche, et qui est symétrique à la fonction sérielle de position en W observée lors de l'analyse des taux de précision (Tydgate & Grainger, 2009). Cette fonction sérielle de position est compatible avec l'hypothèse selon laquelle les mécanismes d'acuité et d'encombrement visuel renforcent respectivement la visibilité de la lettre en position centrale et des lettres en position externe (Grainger, Dufau, et al., 2016). En outre, les résultats montrent que cette fonction sérielle de position est modulée par le niveau de lecture. En effet, plus le niveau de lecture est élevé, plus les lettres aux positions 1, 2 et 3 sont traitées rapidement, alors que le temps de traitement des lettres aux positions 4 et 5 reste stable, quel que soit le niveau de lecture. De manière similaire, Grainger et al. (2016) ont mis en évidence que le taux de précision pour la première lettre dans un report de lettres était soumis

à la modulation du niveau de lecture chez les enfants qui apprennent à lire. Ces résultats sont cohérents avec la théorie des champs récepteurs modifiés (Tydgat & Grainger, 2009), qui explique que les champs récepteurs des détecteurs de lettres situés dans le champ visuel gauche sont élargis vers la gauche. Cette modification réduit l'effet d'encombrement visuel généré par les lettres situées à droite. Les lettres situées dans le champ visuel gauche ne sont alors sensibles qu'à l'encombrement visuel de la lettre située à leur gauche, ce qui diminue les effets d'interférence lors de leur identification. Cette modification est fonction du niveau de lecture et est particulièrement apparente dans le traitement de la première lettre qui n'est pas flanquée par d'autres lettres à gauche et n'est donc pas exposée à l'effet d'encombrement visuel. Cependant, cette modification s'applique également aux autres lettres dans le champ visuel gauche, ce qui explique la modulation par le niveau de lecture du temps de traitement des lettres situées aux positions 1, 2 et 3 dans la tâche TSI. En somme, ces résultats confirment la mise en place d'un mécanisme EPS implémenté par des détecteurs de lettres centrés sur le regard, dont les champs récepteurs sont modifiés au cours de l'apprentissage de la lecture (Grainger, Dufau, et al., 2016).

Deuxièmement, dans la tâche SDM, un large effet de Transposition de Lettres (TL) a été observé, conformément à ce qui a déjà été observé chez les adultes et les apprentis lecteurs (e.g., Duñabeitia et al., 2012, 2015; Massol et al., 2013). Nos résultats mettent également en évidence une variation de l'effet TL en fonction du niveau de lecture des participants, celui-ci augmentant avec le niveau de lecture mesuré à *L'Alouette*. Cette observation apporte un éclairage nouveau sur l'origine de l'effet TL. Tout d'abord, il est peu probable que le mécanisme de bruit de position soit la seule source de l'effet TL (Gomez et al., 2008; Norris, 2006) car, dans ce cas, aucun effet de modulation par le niveau de lecture n'est attendu. Ensuite, l'hypothèse du *lexical tuning* de Castles et al. (2007), selon laquelle l'effet TL augmenterait au cours des premières phases de l'apprentissage de la lecture avant de diminuer lorsque les représentations lexicales sont stabilisées, ne semble pas être étayée par les résultats, même si

on peut argumenter que nos résultats ne décrivent que la phase finale de la trajectoire ascendante prédite par l'hypothèse du *lexical tuning*. Cela reste néanmoins peu probable étant donné que nos participants étaient des enfants en 6<sup>ème</sup> année, engagés depuis plusieurs années dans l'apprentissage de la lecture et supposés avoir établi des représentations orthographiques stables. De plus, des études antérieures suggèrent que les effets TL diminuent chez les enfants en 5<sup>ème</sup> année d'apprentissage (CM2). Ainsi, nos résultats semblent plus cohérents avec l'émergence d'un mécanisme EPI spécifique dont l'efficacité augmente avec l'expertise en lecture (Grainger, Dufau, et al., 2016).

Troisièmement, les résultats de la tâche FLLD indiquent un effet facilitateur des flanqueurs reliés, qu'ils soient inversés ou non, sur le traitement du mot cible. Cet effet ne varie pas en fonction du niveau de lecture et est cohérent avec les résultats obtenus par Snell et al. (2021). Il n'est pas surprenant de constater cela étant donné que le matériel utilisé dans la présente étude a été tiré de l'étude de Snell et al. (2021) qui avait déjà évalué des enfants de 6<sup>ème</sup> année. Le matériel comprenait des mots courts et fréquents, ce qui visait à réduire les contraintes sur le mécanisme d'intégration spatiale. Il est possible que cette réduction des contraintes ait créé un effet plafond, empêchant la modulation du mécanisme d'intégration spatiale par le niveau de lecture. En effet, les lecteurs les moins performants seraient déjà capables d'intégrer spatialement l'information orthographique des mots courts et fréquents. Pour déterminer avec plus de certitude si le mécanisme d'intégration spatiale est modulé par l'expertise en lecture, il serait nécessaire d'augmenter les contraintes sur ce mécanisme en utilisant, par exemple, des mots plus longs et moins fréquents dans les futures études. En tout cas, les résultats de la tâche FLLD montrent que le mécanisme d'intégration spatiale est opérationnel chez les enfants de 6<sup>ème</sup> année d'apprentissage de la lecture (Grainger, Dufau, et al., 2016).

En examinant les effets expérimentaux observés dans les tâches TSI, SDM et FLLD, nous avons constaté que les signatures empiriques associées aux mécanismes EPS, EPI et IS



étaient bien présente, témoignant de leur implication pour résoudre les tâches considérées. À partir de là, nous suggérons que la performance globale d'un participant dans une tâche donnée puisse refléter son efficacité pour le mécanisme orthographique associé à cette tâche. Nous avons donc calculé le taux de précision et le temps de réponse moyen pour chaque participant dans chaque tâche, puis standardisé ces valeurs pour réaliser une analyse corrélacionnelle qui visait à décrire les relations d'efficacité entre les mécanismes EPS, EPI et IS.

#### **2.2.4.2. Analyses de relations d'interdépendance entre les tâches TSI, SDM et FLLD pour l'exploration de l'hypothèse de coévolution des mécanismes orthographiques.**

Selon l'architecture proposée par Grainger et al. (2016), les mécanismes EPS, EPI et IS sont fonctionnellement interdépendants. D'une part, la qualité de l'information encodée par le mécanisme EPI dépend de la qualité de l'information encodée par le mécanisme EPS, ce qui implique une forte corrélation entre les performances obtenues à la tâche TSI et celles obtenues à la tâche SDM. D'autre part, le mécanisme IS nécessite de l'information orthographique invariante à l'emplacement, qui dépend à la fois des mécanismes EPS et EPI pour un encodage de qualité. Par conséquent, l'efficacité du mécanisme EPS est nécessaire mais pas suffisante pour l'efficacité du mécanisme IS. Ainsi, on s'attend à une corrélation plus forte entre les performances aux tâches SDM et FLLD (associées aux mécanismes EPI et IS) qu'entre les performances aux tâches TSI et FLLD (associées aux mécanismes EPS et IS). Les résultats de l'analyse corrélacionnelle montrent un schéma de résultats similaire à celui prédit ci-dessus. Les tâches TSI et SDM, d'une part, et les tâches SDM et FLLD, d'autre part, sont significativement et également corrélées, alors que la corrélation entre les tâches TSI et FLLD n'est pas significative. Les corrélacions TSI-SDM et SDM-FLLD pour les temps de réaction sont également équivalentes et plus élevées que la corrélation TSI-FLLD<sup>19</sup>.

---

<sup>19</sup> Le lecteur notera que les différences descriptives mentionnées pour les temps de réaction ne se sont néanmoins pas révélées significatives lors des analyses inférentielles.

Ces résultats constituent la première démonstration de l'interdépendance fonctionnelle des mécanismes de l'interface orthographique de (Grainger, Dufau, et al., 2016). Toutefois, cette conclusion a certaines limites liées aux données recueillies. En effet, les corrélations, en particulier pour les taux de précision, sont faibles (J. Cohen, 2013), ce qui peut s'expliquer par le fait que les valeurs de corrélation sont sensibles aux valeurs aberrantes. Le choix méthodologique de conserver tous les participants dans l'analyse corrélacionnelle pour avoir un échantillon représentatif peut avoir conduit à inclure des participants avec des performances aberrantes, diminuant ainsi la force des corrélations observées, comme l'ont souligné Goodwin et Leech (2006).

De manière plus critique, les résultats obtenus soulèvent des interrogations quant à l'interprétation des corrélations observées, notamment en ce qui concerne la nature des processus les sous-tendant. Bien que chaque tâche mobilise spécifiquement un mécanisme orthographique, elles impliquent également des processus communs tels que la prise de décision ou l'utilisation de la mémoire de travail. Ainsi, les corrélations observées pourraient simplement refléter l'activité de ces processus partagés plutôt que l'interdépendance fonctionnelle des mécanismes orthographiques. Pour résoudre ce problème, il faudrait trouver des tâches qui soient similaires en termes de processus décisionnels et cognitifs mais qui engagent des mécanismes orthographiques différents. L'utilisation d'une quatrième tâche de même nature, mais n'engageant aucun des mécanismes orthographiques considérés, permettrait de contrôler l'influence des processus partagés entre les tâches et d'attribuer avec certitude la source des corrélations aux interdépendances fonctionnelles existant entre les mécanismes orthographiques.

### ***2.2.5. Conclusion***

L'objectif de cette étude était de caractériser la modulation des mécanismes EPS, EPI et IS en fonction du niveau de lecture et de préciser les relations d'interdépendance fonctionnelle

entre ces mécanismes. Les résultats obtenus dans chacune des tâches ont permis de confirmer les conclusions de la littérature et de soutenir l'architecture proposée par Grainger et al. (2016) pour le traitement orthographique. Ensuite, une analyse corrélacionnelle de la performance des participants aux tâches TSI, SDM et FLLD a été réalisée pour décrire les relations d'interdépendance fonctionnelle possibles entre les mécanismes EPS, EPI et IS. Les résultats ont suggéré que la qualité de l'encodage position-invariant (EPI) dépendait de la qualité de l'encodage position spécifique et que la qualité de l'intégration spatiale dépendait de la qualité de l'encodage position-invariant et de l'encodage position-spécifique, ce dernier étant nécessaire mais non suffisant. Cependant, ces conclusions doivent être interprétées avec précaution, car les limites méthodologiques de cette étude doivent être levées par de futures recherches.

## **CHAPITRE 3. L'ENCODAGE ORTHOGRAPHIQUE DES UNITES LETTRE, MOT, PHRASE**

L'objectif de ce troisième chapitre est de caractériser l'hypothèse de la coévolution des mécanismes orthographiques dans une perspective différente de celle adoptée au Chapitre 1. Plutôt que d'analyser directement les mécanismes orthographiques à travers leur signature empirique, l'approche proposée ici consistera à examiner leur activité en fonction des unités orthographiques qu'ils encodent, à savoir la lettre, le mot et la phrase. Selon cette approche, l'encodage de ces unités sollicite différemment les mécanismes d'Encodage Position-Spécifique (EPS), d'Encodage-Position-Invariant (EPI) et d'Intégration Spatiale (IS) définis dans le Chapitre 1. Ainsi, l'encodage de l'identité des lettres est supposé être réalisé au moyen du mécanisme EPS mis en œuvre par les détecteurs de lettres centrés sur le regard, à un stade précoce du traitement orthographique. L'encodage du mot exigerait de connaître l'identité et la position relative des lettres, nécessitant l'implication coordonnée des mécanismes EPS et EPI. L'encodage de la phrase impliquerait, quant à lui, la mobilisation des mécanismes EPS et EPI à travers plusieurs mots en parallèle, ce qui implique un mécanisme d'intégration spatiale particulièrement efficace. Ainsi, les mécanismes orthographiques s'imbriquent pour encoder des unités de plus en plus grandes. Cette idée est exprimée clairement par Grainger (2018) dans la citation suivante : *"les lettres sont les blocs de constructions des mots, et les mots sont les blocs de construction des phrases"*.

Bien que la quantification précise de la contribution respective des mécanismes EPS, EPI et IS à l'encodage des différentes unités orthographiques soit complexe, nous avancerons ici que chaque unité est principalement soutenue par un mécanisme spécifique. Ainsi, le mécanisme EPS serait crucial pour l'encodage de la lettre, le mécanisme EPI pour le mot, et le mécanisme IS pour la phrase. Il est évident que l'encodage d'une unité d'ordre supérieur (comme la phrase) implique l'utilisation des mécanismes nécessaires à l'encodage des unités d'ordre

inférieur (c'est-à-dire les mécanismes EPS et EPI) sans que ces mécanismes ne soient suffisants à eux seuls. Dans le cadre de cette proposition, la qualité de l'encodage d'une unité doit permettre d'évaluer l'efficacité du mécanisme principal qui lui est associé. Cette approche nous paraît intéressante, car l'encodage des unités lettre, mot et phrase, peut être exploré à travers des tâches méthodologiquement similaires, telles que la tâche de Décision Alphabétique (DA), la tâche de Décision Lexicale (DL) et la tâche de Décision Grammaticale (DG).

Ce chapitre est structuré en trois parties, chacune se focalisant sur une des unités orthographiques examinées. L'objectif est de déterminer dans quelle mesure les mécanismes EPS, EPI et IS sont sollicités pour l'encodage de ces unités et comment leur performance peut être évaluée en utilisant les tâches DA, DL et DG. Les hypothèses formulées dans le Chapitre 1 sur la coévolution des mécanismes orthographiques sont maintenues, à l'exception de celles sur l'utilisation des signatures empiriques obtenues dans les tâches TSI, SDM et FLLD, qui sont remplacées par des mesures de performance obtenues dans les tâches DA, DL et DG. Les mesures de performance en question réfèrent au temps de réaction moyen par participant pour effectuer chacune des décisions considérées.

### **3.1.L'encodage de l'unité lettre**

Il est aujourd'hui communément admis que, chez l'adulte normo-lecteur, l'identification automatique des mots écrits via l'interface orthographique repose sur l'analyse des lettres pour les langues utilisant des scripts alphabétiques (Grainger, 2008; Grainger, Dufau, et al., 2016). Cette hypothèse est soutenue par un argument computationnel : l'invariance de forme, évoquée dans la partie introductive, est moins coûteuse à réaliser au niveau de la lettre ( $N = 26$  pour le script latin) qu'au niveau du mot ( $N \approx 60000$  formes orthographiques d'usage courant pour le français).

Les modèles du traitement du mot écrit distinguent en général deux niveaux de représentation distincts pour les lettres et les mots. Par exemple, le modèle d'activation-interactive (McClelland & Rumelhart, 1981; Rumelhart & McClelland, 1982) est composé de trois niveaux de représentation, ou trois types d'unités, qui sont activés de manière hiérarchique lors du traitement d'un mot : les traits des lettres, les lettres et les mots. Ainsi, l'identification des lettres est basée sur l'identification de leurs traits caractéristiques, tout comme l'identification des mots repose sur l'identification des lettres. Dans le modèle de (Grainger et al., 2008), développé sur la base de celui de Riesenhuber et Poggio (1999), plusieurs couches de détecteurs, organisées de manière hiérarchique, codent des traits caractéristiques de plus en plus complexes. Aux premiers niveaux, les détecteurs sont dédiés à la détection des traits simples des lettres et de leur orientation. Ensuite, les détecteurs deviennent sensibles à la combinaison des traits, permettant d'activer les détecteurs de lettres sensibles à la forme. Dans une dernière étape, le détecteur associé à la représentation abstraite de la lettre est activé. La Figure 32 illustre ce processus.

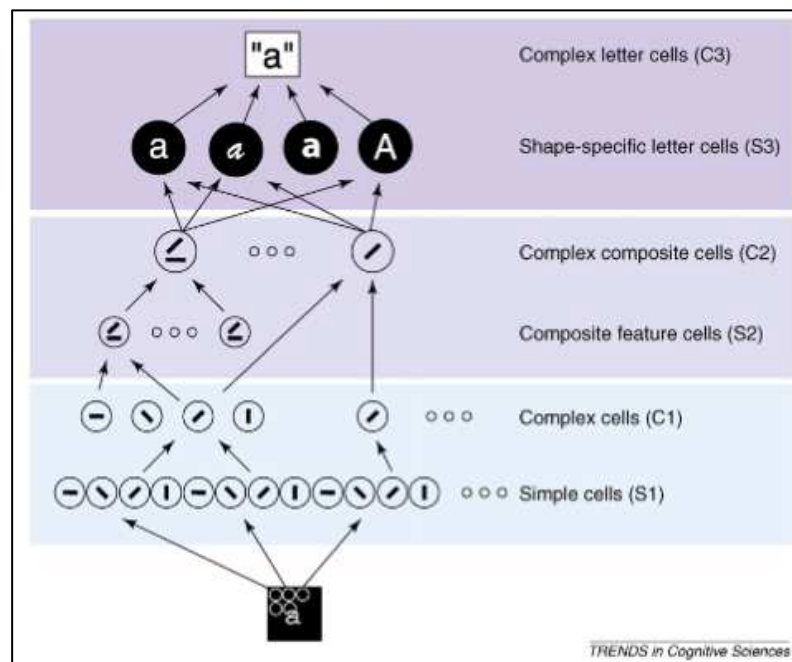


Figure 32. Adaptation du modèle de Riesenhuber et Poggio (1999) par Grainger et al. (2008)

Le processus d'identification des lettres, décrit par Riesenhuber et Poggio (1999), a été étudié avec divers dispositifs expérimentaux. L'objectif de ces études était de déterminer les facteurs qui influencent l'identification des lettres. Bien que de nombreuses études aient cherché à caractériser la nature de l'encodage des traits des lettres, d'autres ont tenté de comprendre comment certaines caractéristiques propres à la représentation abstraite de la lettre, comme sa fréquence d'occurrence dans le langage écrit, pouvaient influencer son identification. Les premières études sur le sujet ont utilisé des tâches de jugements perceptuels dans lesquelles les participants devaient déterminer si deux lettres étaient identiques ou non. Cependant, ces études n'ont pas réussi à mettre en évidence un effet de la fréquence de la lettre (Appelman & Mayzner, 1981). Cette absence d'effet pourrait être expliquée par le fait que la tâche de jugement perceptuel n'est pas sensible à cette étape de traitement. En effet, dans cette tâche, une comparaison des lettres sur la base de leur forme visuelle, plutôt que sur la base de leur identité, serait suffisante (Appelman & Mayzner, 1981; Posner & Mitchell, 1967). Ainsi, cette tâche ne serait pas la plus adaptée pour déterminer dans quelle mesure le détecteur associé à la lettre reconnue a été activé.

En revanche, l'usage d'autres tâches ont permis de mettre en évidence un effet de la fréquence des lettres (e.g., tâche de discrimination : Cosky, 1976 ; tâche de recherche : Pitchford et al., 2008 ; tâche de dénomination : Cosky, 1976 ; tâche de décision alphabétique : New & Grainger, 2011). La mise en évidence de cet effet de fréquence des lettres nécessite que le détecteur associé à la lettre reconnue soit activé, ce qui suggère que les tâches utilisées sont liées au mécanisme EPS. Parmi ces tâches, la tâche de décision alphabétique est particulièrement sensible à ce type de traitement (Jacobs et al., 1995; Jacobs & Grainger, 1991; Ziegler et al., 2000). Les temps de réaction recueillis dans cette tâche sont supposés refléter le résultat final de l'ensemble des processus ayant conduit à l'identification de la lettre, c'est-à-dire l'ensemble des processus ayant conduit à l'activation de son identité abstraite. Les données

recueillies en électrophysiologie permettent de montrer que cette activation se produit au cours des 150 à 200 premières millisecondes du traitement orthographique (Grainger et al., 2008; Madec et al., 2012; Petit et al., 2006). Dans la même veine, Wong et al. (2005) ont montré que la composante N170 était sensible à la différence entre les lettres et les pseudo-lettres. Ce dernier résultat est particulièrement intéressant au regard de la fenêtre temporelle dans laquelle les détecteurs de lettres centrés sur le regard sont censé agir. En effet, selon Holcomb et Grainger (2006) (voir aussi Grainger & Holcomb, 2009) la connexion entre les caractéristiques visuelles et les représentations des lettres spécifiques à l'emplacement serait reflétée par la composante N/P150 observée sur les électrodes occipitales et frontales à 150 ms après la présentation de la cible. Selon des données en neuro-imagerie ces opérations seraient réalisées par des structures neuronales du gyrus fusiforme postérieur chargé des traitements orthographiques précoces (Dehaene et al., 2004).

En résumé, la reconnaissance de l'identité abstraite des lettres repose sur l'extraction de leurs traits caractéristiques à travers un traitement hiérarchique. Les recherches en électrophysiologie ont montré que l'identification de la lettre intervient tôt, environ 150 ms après sa présentation. Cette fenêtre temporelle correspond également à celle associée à l'activité des détecteurs de lettres centrés sur le regard. Bien que les modèles d'identification des lettres ne puissent pas être directement comparés à l'architecture proposée par Grainger, Dufau, et al., (2016) , ces données suggèrent une analogie entre l'activité des processus d'identification des lettres et l'activité du mécanisme EPI implémenté par les détecteurs de lettres centrés sur le regard. Dans ce cadre, la tâche de décision alphabétique apparaît comme un paradigme adapté à l'évaluation de l'efficacité de ces processus. L'emploi de cette tâche présente l'avantage de disposer, comme nous le verrons dans les sections suivantes, d'une procédure expérimentale relativement proche de celle utilisée pour examiner les processus d'identification du mot écrit et de la phrase.



### 3.2.L'encodage de l'unité mot

Les dernières décennies ont vu une importante exploration des processus d'encodage de l'unité mot, conduisant à une conceptualisation du traitement du mot écrit par différents champs disciplinaires (e.g., en génétique : Gayán & Olson, 2003 ; en neurosciences : Dehaene et al., 2005 ; en psychologie cognitive : Grainger & van Heuven, 2003). De nombreuses synthèses de référence ont été produites à cet égard (e.g., Adelman, 2013). Cependant, cette section n'a pas vocation à les résumer de manière exhaustive. Nous proposons plutôt d'opérer une simplification de ces connaissances afin de mettre en évidence que l'activité du mécanisme d'Encodage Position-Invariant (EPI), qui participe à l'encodage à l'unité mot, peut être évaluée à l'aide de la tâche de décision lexicale. Cette assertion relève de la simplification dans la mesure où le temps nécessaire à la réalisation d'une décision lexicale représente l'addition d'un ensemble de processus permettant la sélection de la représentation orthographique associée au mot lu. Parmi ces processus dont l'influence a été largement démontrée au cours des dernières décennies, nous pouvons citer la phonologie (Brysbaert, 2022; Frost et al., 1987), la morphologie (Diependaele, Grainger, et al., 2012) ou encore la compétition lexicale (Grainger & Jacobs, 1996). Dans ce cadre, l'activité du mécanisme EPI ne constitue qu'une partie de la variance du temps de décision lexicale.

Théoriquement, la part de variance expliquée par le mécanisme EPI dans les temps de décision lexicale est susceptible d'être significative. En effet, comme exposé dans le chapitre 1, les bigrammes ouverts implémentant le mécanisme EPI dans le modèle de Grainger, Dufau, et al. (2016) sont préférentiellement utilisés pour encoder l'identité et la position des lettres dans les mots fréquemment rencontrés par le lecteur. L'activation de ces représentations bigrammes permet ensuite d'activer l'ensemble des représentations orthographiques compatibles. Par exemple, le mot "VITE" activera les bigrammes VI, VT, VE, IT, IE, et TE qui pourront activer les représentations orthographiques compatibles telles que VITE, VOTE ou encore SITE. La

première représentation orthographique qui atteint le seuil d'activation est sélectionnée pour produire une réponse. De nombreuses études ont montré que la capacité à atteindre ce seuil d'activation pouvait être modulée par des processus de compétition lexicale sensible à la fréquence des représentations orthographiques (pour une revue voir Brysbaert et al., 2011) ou encore à la taille de leur voisinage orthographique (Grainger, 1990). Ainsi, les mots de haute fréquence sont reconnus plus rapidement que les mots de basse fréquence (e.g., le mot VITE est plus fréquent que les mots VOTE et SITE), alors que les mots ayant un voisinage orthographique important sont reconnus moins rapidement que les mots ayant un voisinage faible (e.g., le mot VITE a un voisinage orthographique plus important que VOTE et SITE). Cependant, si les mots sélectionnés dans une tâche de décision lexicale ont une fréquence et un voisinage orthographique relativement homogènes et qu'aucun mot ne se distingue par des valeurs aberrantes sur ces dimensions, alors il est possible de considérer que les effets de compétition lexicale s'annulent et que la part de variance expliquée par cet effet sur les temps de réaction moyen par participant soit négligeable. Par conséquent, la variabilité observée serait alors susceptible d'être plus sensible aux processus orthographiques de base, et en particulier au mécanisme EPI qui joue un rôle clé dans la sélection de la représentation orthographique.

Au niveau empirique, l'activité du mécanisme EPI a été largement examinée à l'aide de la tâche de jugement perceptif (voir la section dédiée, p.45). Cette tâche présente l'avantage d'écartier l'influence des processus de compétition lexicale puisque la comparaison de deux chaînes de consonnes (e.g., RZSK-RSZK) ne requiert pas l'activation d'une représentation lexicale et peut être réalisée uniquement sur la base des informations relatives à l'identité et à la position des lettres. Cependant, l'activité du mécanisme EPI a été étudié à l'aide d'autres paradigmes expérimentaux et notamment la tâche de décision lexicale. Grainger, Lété, et al. (2012) ont par exemple montré que le rejet de non-mots formés par la transposition de lettres d'un mot valide (e.g., "retse" construit à partir de "reste") était plus difficile que le rejet de non-

mots formés par la substitution des lettres d'un mot valide (e.g., "rebde" construit à partir de "reste"). Ce résultat est compatible avec l'hypothèse que l'activité des bigrammes associés au non-mot transposé génère une activation des représentations orthographiques compatibles supérieure à celles des bigrammes associés aux non-mots substitués (le non-mot transposé "retse" partage neuf bigrammes avec le mot "reste", alors que le non-mot substitué "rebde" n'en partage que trois). Dans ce cadre, l'activité du mécanisme EPI jouerait un rôle significatif dans le processus de décision lexicale. Toutefois, ces interprétations sont basées sur l'analyse des rejets effectués par les participants dans la tâche de décision lexicale (i.e., les réponses "non"). Or, ce sont traditionnellement les réponses "oui" qui sont analysées (Diependaele, Brysbaert, et al., 2012), car elles sont supposées être une mesure de l'accès lexical (Balota & Chumbley, 1984). Ainsi, du fait de la complexité des processus engagés dans la tâche de décision lexicale (Dufau et al., 2012) ; Ziegler et al. (2014) reconnaissent que l'interprétation de l'effet de transposition de lettres sur les réponses "non" d'une tâche de décision lexicale peut être limitée. En effet, selon ces auteurs, la variation des effets TL ne peut pas être attribuée de manière certaine à l'activité du mécanisme EPI. Deux lectures des variations de l'effet TL peuvent en effet être proposées. Soit l'effet TL est expliqué par l'activité du mécanisme EPI, auquel cas plus l'encodage de la position des lettres est flexible, plus l'effet TL devrait être large. Soit l'effet TL est expliqué par la qualité de la représentation lexicale, auquel cas moins la représentation lexicale est stabilisée, plus l'effet TL devrait être large. Pour remédier à ce problème, Ziegler et al. (2014) proposent d'utiliser une tâche de décision lexicale couplée à un paradigme d'amorçage masqué en sandwich (Lupker & Davis, 2009). Dans les paradigmes d'amorçage masqué, la cible sur laquelle le participant effectue sa décision lexicale est toujours précédée par une amorce dont le participant n'a pas conscience, car elle est présentée pendant une durée très brève (environ 50 ms). Malgré la brièveté de sa présentation, l'amorce influence le temps de traitement de la cible. Dans la procédure d'amorçage, plutôt que de modifier la cible, c'est l'amorce qui est

manipulée de sorte à obtenir une condition transposée (retse-RESTE) et une condition substituée (rebde-RESTE). Les participants répondent "oui" aux deux conditions d'amorçage, ce qui permet d'attribuer l'effet d'amorçage de manière univoque à des traitements de nature orthographique qui sont supportés par le mécanisme EPI. En utilisant ce paradigme d'amorçage en sandwich, Ziegler et al. (2014) ont réussi à montrer que les amorces transposées interféraient plus avec la reconnaissance de la cible que les amorces substituées. Ce résultat suggère que le mécanisme EPI exerce bien une action sur la reconnaissance du mot écrit lors de la tâche de décision lexicale, et que les temps de réaction recueillis sur les réponses "oui" dans cette tâche sont susceptibles de révéler la part de variabilité attribuable à l'efficacité du mécanisme EPI.

En résumé, nous avons fait l'hypothèse que les temps de réaction mesurés dans la tâche de décision lexicale sont affectés par les effets de transposition de lettres, ce qui suggère que l'activité du mécanisme EPI pourrait expliquer une partie de la variance observée, même si cette part n'a pas encore été quantifiée avec précision. Par ailleurs, bien que de nombreuses études ont montré que les temps de décision lexicale étaient sensibles aux processus de compétition lexicale, ces effets peuvent être contrôlés afin de les rendre plus sensibles aux processus orthographiques de base et en particulier à l'activité du mécanisme EPI. Dans ce cadre, la tâche de décision lexicale apparaît comme une méthode adaptée pour évaluer l'efficacité du mécanisme EPI.

### **3.3.L'encodage de l'unité phrase**

Dans cette section, nous nous intéressons à l'encodage de l'unité phrase, qui consiste à créer une représentation syntaxique de la phrase à partir de l'identité des mots qui la composent. La construction d'une telle représentation a été traditionnellement étudiée à travers des tâches papier-crayon où les participants doivent évaluer si une séquence de mots est conforme ou non aux règles syntaxiques de la langue (Chomsky, 1957). Cependant, ce type de tâche ne permet

pas de mesurer précisément le traitement simultané des mots. Récemment, des dispositifs expérimentaux ont été développés pour évaluer la construction des représentations syntaxiques en obligeant les participants à traiter les mots de manière simultanée. Parmi ces dispositifs, le paradigme de Présentation Visuelle Parallèle Rapide (PVPR ; Snell & Grainger, 2017) et la tâche de décision grammaticale ont été largement utilisés (Mirault & Grainger, 2020).

Le paradigme PVPR consiste à présenter brièvement une séquence de mots au centre de l'écran. La durée de présentation n'excède généralement pas la durée d'une fixation oculaire, de sorte que le participant qui fixe le centre de l'écran n'a pas la possibilité de déplacer son regard sur les autres mots de la séquence. Une fois présentée, la séquence est masquée, et le participant doit reporter l'un des mots dont la position lui est indiquée. Dans ces études, les auteurs ont observé qu'il était plus facile de reporter le mot "blanc" lorsque celui-ci se trouvait dans la séquence grammaticale ("le chat blanc est gros") que lorsqu'il se trouvait dans une séquence non grammaticale ("le chat gros blanc est") (e.g., Snell & Grainger, 2017). Cet effet que les auteurs ont nommé "effet de supériorité de la phrase", est interprété comme étant la preuve que l'identité des mots de la phrase est traitée simultanément et intégrée dans une représentation syntaxique qui, en retour, contraint l'identification des mots de la séquence. En effet, la représentation syntaxique génèrerait des attentes sur l'identité des mots à une certaine position, ce qui favorisait l'identification des mots dont la position respecte les conventions syntaxiques de la langue.

Dans cette même veine, la tâche de décision grammaticale, construite sur le modèle de la tâche de décision alphabétique et de la tâche de décision grammaticale, consiste à déterminer si une séquence présentée brièvement est grammaticale ou non grammaticale. Dans cette tâche, Mirault et Grainger (2020) ont comparé le traitement de deux types de séquences non grammaticales. Le premier type de séquence était construit à partir de la transposition de deux mots dans une séquence grammaticale (e.g., "cette grande tasse est cassée" → "cette grande est

tasse cassée"). Le second type de séquence était obtenu à partir de la transposition de deux mots dans une séquence qui était déjà non grammaticale (e.g., "cette grande tasse est faim" → "cette grande est tasse faim"). Les auteurs ont observé que les séquences non grammaticales du premier type ("cette grande est tasse cassée") étaient plus difficiles à rejeter que les séquences du second type ("cette grande est tasse faim"). Cet effet de transposition de mots serait comparable à l'effet de transposition de lettres observé en tâche de décision lexicale, dans la mesure où il existerait un mécanisme de bruit dans l'assignation de la position des mots dans la phrase, tout comme il en existe un dans l'assignation de la position des lettres dans le mot. Dans le cas de la phrase, l'identité des mots serait extraite simultanément à travers la séquence, avec une certaine flexibilité à une position donnée. Par exemple, pour la séquence "cette grande est tasse cassée", le mot "tasse" est identifié à la position 4. Cependant, du fait du mécanisme de flexibilité, une certaine quantité d'activation pour le mot "tasse" à la position 3 existerait, et inversement pour le mot "est". Ainsi, cette flexibilité permet de générer un certain niveau d'activation pour la séquence grammaticale qui code le mot "tasse" en position 3 et le mot "est" en position 4 ("cette grande tasse est cassée"). Le même mécanisme de flexibilité agirait sur les séquences de second type ("cette grande est tasse faim") mais son action conduirait dans ce cas à l'activation d'une séquence non grammaticale ("cette grande tasse est faim"). Au-delà de cet effet de transposition, le point important à retenir est que l'action du mécanisme de flexibilité repose sur le traitement en parallèle des mots.

Les résultats obtenus dans le paradigme PVPR et la tâche de décision grammaticale suggèrent que le participant est activement engagé dans un traitement parallèle des mots. En effet, dans ces deux paradigmes, les durées de présentation sont si brèves que les participants n'ont pas le temps d'effectuer des fixations au-delà du mot fixé se trouvant au centre de la séquence. Dès lors, toute influence des mots environnants ne peut être expliquée que par leur traitement en parallèle. Dans cette perspective, la capacité à élaborer une représentation

syntaxique de la phrase dans ces deux tâches pourrait être corrélée à la capacité à intégrer spatialement de l'information orthographique à travers plusieurs mots. Comme nous l'avons vu au Chapitre 1, cette capacité peut être évaluée à l'aide d'une tâche de décision lexicale à lettre flanquée. Dans cette tâche, la littérature montre de manière convergente que la présence de flanqueurs reliés orthographiquement (e.g., ro rock ck) facilite la reconnaissance du mot cible contrairement à des flanqueurs qui ne seraient pas reliés orthographiquement (e.g., st rock ep). Cependant, l'intégration spatiale à l'œuvre dans la tâche FLLD pourrait devenir pénalisante dans les tâches RPVP et grammaticale. En effet, dans la tâche FLLD, les informations des mots  $n-1$  et  $n+1$  sont intégrées spatialement pour le traitement du mot  $n$ , alors que dans les tâches RPVP et grammaticale, Les information extraites des mots  $n-1$  et  $n+1$  ne doivent pas être intégrées avec celles du mot  $n$  au risque de créer des mots illusoires. En réalité, le processus d'intégration spatiale semble opérer de manière différente selon les paramètres de la tâche. En effet, Snell et Grainger (2017) ont montré que le traitement de l'information parafovéale (mot  $n-1$  et  $n+1$ ) différait selon que le participant était engagé dans le traitement de la phrase dans son ensemble ou dans le traitement d'un mot en particulier. Lorsque les participants devaient focaliser leur attention sur le traitement d'un mot particulier, comme cela est le cas dans la tâche FLLD, ce traitement était facilité par la présence de flanqueurs reliés syntaxiquement. En revanche, lors de la lecture de phrase, le temps de fixation sur le mot fixé n'était pas impacté par la présence d'un mot  $n+1$  relié syntaxiquement. Cependant, le temps de fixation sur ce mot  $n+1$  était diminué lorsqu'il était précédé d'un mot syntaxiquement congruent. Ces résultats confortent l'hypothèse selon laquelle les informations extraites des mots en parallèle sont activement intégrées pour le traitement du mot fovéal dans la tâche FLLD, alors que ces informations ne sont pas intégrées dans les tâches RPVP et grammaticale afin de permettre la construction d'une représentation syntaxique de la phrase dans laquelle les informations extraites en parallèle doivent rester reliées à des positions spécifiques. Toutefois, bien que la manière dont

l'information extraite des mots en parallèle est intégrée diffère selon la tâche utilisée, nous proposons que le mécanisme de base à l'œuvre dans toutes ces tâches, à savoir l'extraction simultanée de l'information orthographique à travers plusieurs mots, est identique.

En résumé, nous proposons que les temps de réactions recueillis dans la tâche de décision grammaticale sont susceptibles d'évaluer correctement l'efficacité du mécanisme d'intégration spatiale observée dans la tâche FLLD, dans la mesure où ces deux tâches nécessitent la même compétence de base : extraire de l'information orthographique en parallèle à travers plusieurs mots.

### **3.4.Synthèse**

Les arguments développés dans ce chapitre avaient pour objectif de démontrer que les tâches AD, LD, et GD étaient bien adaptées pour évaluer l'efficacité des mécanismes EPS, EPI, et IS au cours de l'apprentissage de la lecture. Comme cela a été mentionné en préambule, il ne s'agissait pas de défendre que ces tâches fournissent des mesures pures de l'efficacité des mécanismes considérés. D'ailleurs, à notre connaissance, aucune étude ne s'est intéressée à quantifier la part de variance expliquée par chacun de ces mécanismes dans chacune de ces tâches. Notre argumentation s'est donc essentiellement appuyée sur des aspects théoriques qui peuvent être discutés (voir la section Discussion pour un développement, p.222). Néanmoins, nous considérons que cette démarche fournit un cadre de travail cohérent et fructueux permettant d'étudier plus finement la coévolution des mécanismes orthographiques au cours de l'apprentissage de la lecture. Au cœur de ces discussions, comme l'ont révélé les éléments développés au Chapitre 1 et 2, l'adéquation des tâches utilisées pour mesurer l'efficacité des mécanismes EPS, EPI et IS constitue un défi majeur. Dans cette perspective, la proposition développée dans ce chapitre constituera certainement un élément central de discussion de cette thèse.



# **CHAPITRE 4. ETUDES EXPERIMENTALES DE L'ENCODAGE ORTHOGRAPHIQUE DES UNITES LETTRE, MOT ET PHRASE**

## **4.1.Étude 3. Étude des relations d'interdépendance fonctionnelle dans l'encodage orthographique des unités lettre, mot et chez l'adulte expert.**

### ***4.1.1. Objectifs***

Dans cette troisième étude, nous avons cherché à décrire les relations entre les différents niveaux de traitement permettant l'accès au sens du texte lu. Ces niveaux de traitement, organisés de manière hiérarchique, permettent d'encoder les trois unités principales de la lecture : la lettre, le mot et la phrase. Dans cette architecture, les traitements permettant l'identification du mot écrit occupent une place centrale puisqu'ils jouent le rôle d'interface entre l'identification des lettres et la construction d'une représentation syntaxique de la phrase. La littérature s'est souvent concentrée sur la description et la modélisation d'un seul niveau de traitement. Dans ce cadre, le traitement du mot écrit a été au centre des recherches sur le traitement orthographique à travers l'utilisation de paradigmes utilisant la présentation de mots isolés, alors que le traitement de la phrase a été le plus souvent étudié dans des conditions de lecture plus écologiques. La relative indépendance de ces champs de recherche rend difficile l'interprétation croisée de leurs résultats.

Afin de surmonter cet écueil, la présente étude visait à mesurer, chez des adultes normo-lecteurs, l'efficacité de ces niveaux de traitement en utilisant trois tâches spécifiques (une tâche de décision alphabétique, une tâche de décision lexicale et une tâche de décision grammaticale) qui exigeaient une réponse binaire rapide quant à l'appartenance ou non du stimulus cible à une catégorie bien définie (lettres, mots, phrases). Du fait de l'organisation hiérarchique des niveaux de traitement, nous attendions des corrélations plus élevées entre les temps de réaction des

niveaux de traitements adjacents, i.e., lettre *vs* mot et mot *vs* phrase, qu'entre les temps de réaction des niveaux non-adjacents, i.e., lettre *vs* phrase.

Le postulat d'une organisation hiérarchique des niveaux de traitement visait à simplifier nos hypothèses de travail. Dans la section discussion, nous analyserons nos résultats avec des hypothèses plus contraignantes sous-tendues par le modèle d'activation interactive (McClelland & Rumelhart, 1981; Rumelhart & McClelland, 1982) et le modèle en triangle (Seidenberg & McClelland, 1989).

## **On the relations between letter, word, and sentence-level processing during reading.**

Brice Brossette<sup>1\*</sup>, Jonathan Grainger<sup>2,3</sup>, Bernard Lété<sup>1</sup> & Stéphane Dufau<sup>2,3,4</sup>

<sup>1</sup> *Laboratoire d'Étude des Mécanismes Cognitifs, Lyon 2 University, Lyon, France*

<sup>2</sup> *Laboratoire de Psychologie Cognitive, CNRS & Aix-Marseille University, 3 place Victor Hugo, 13331 Marseille, France*

<sup>3</sup> *Institute for Language Communication and the Brain, Aix-Marseille University, Marseille, France*

<sup>4</sup> *Queensland Brain Institute, University of Queensland, Brisbane, Queensland, Australia*

*Scientific Reports, 2022, Volume 12, 17735.*

\*Correspondence concerning this article should be addressed to Brice Brossette, Laboratoire d'Étude des Mécanismes Cognitifs, 5 Avenue Pierre Mendès France, 69500 Bron, France, Email: [brice.brossette@univ-lyon2.fr](mailto:brice.brossette@univ-lyon2.fr)

Short title: letters, words, sentences

Word count: 4276 words

Copyright : The Author(s) 2022

<https://doi.org/10.1038/s41598-022-22587-1>

Soumis le 30 mars 2022 ; Accepté le 17 octobre 2022.

#### ***4.1.2. Abstract***

Much prior research on reading has focused on a specific level of processing, with this often being letters, words, or sentences. Here, for the first time in adult readers, we provide a combined investigation of these three key component processes of reading comprehension. We did so by testing the same group of participants in three tasks thought to reflect processing at each of these levels: alphabetic decision, lexical decision, and grammatical decision. Participants also performed a non-reading classification task, with an aim to partial-out common binary decision processes from the correlations across the three main tasks. We examined the pairwise partial correlations for response times (RTs) in the three reading tasks. The results revealed strong significant correlations across adjacent levels of processing (i.e., letter-word; word-sentence) and a non-significant correlation between non-adjacent levels (letter-sentence). The results provide an important new benchmark for evaluating computational models that describe how letters, words, and sentences contribute to reading comprehension.

Keywords: reading; alphabetic decision; lexical decision; grammatical decision

### ***4.1.3. Introduction***

For readers of a language written with an alphabetic script, fluent reading behavior essentially involves extracting information about letter identities and their positions to identify words and word order, and from there to construct a sentence-level representation for comprehension. Although this deliberate over-simplification ignores the well-established roles played by phonology (Brysbart, 2022), and morphology (Diependaele, Grainger, et al., 2012) in skilled reading, and also the higher-level processes involved in text comprehension (Kintsch & Rawson, 2008), we believe that it accurately highlights three key component processes involved in transforming visual features into meaning during reading. In the present study we investigate, for the first time, the processing interactions between these three levels. Prior research has either focused on a single level of processing, or the interactivity between two levels (letter-word or word-sentence: these interactions are respectively illustrated by path (a) and path (b) in Figure 1). We note nevertheless that, contrary to adult studies, developmental studies of reading typically use several tasks such as reading aloud, rapid automatized naming (RAN), reading comprehension (e.g., Landerl et al., 2019; Lefevre et al., 2021; Muter et al., 2004). Focusing on letter, word, and sentence processing allowed us to employ three very comparable tasks when measuring the processing at each of these levels. These are the alphabetic decision task (Jacobs & Grainger, 1991), the lexical decision task (Meyer & Schvaneveldt, 1971), and the grammatical decision task (Mirault et al., 2018). All three tasks are speeded binary decision tasks with a clearly defined target category and well-defined criteria for constructing non-target stimuli (see examples in Figure 33).

In order to investigate interactions between these three key component processes, in the present study participants performed alphabetic, lexical, and grammatical decision tasks, and we examined correlations between performance in each of the three tasks with the aim to evaluate the interdependence of processing across each of the three putative levels being

examined (letter, word, sentence). We then used the obtained correlations to examine possible differences in the interdependencies between processing at the letter, word, and sentence levels. Thus, it is possible that word recognition is highly constrained by letter-level processing, whereas a similar contingency might not be so strong for word and sentence-level processing. It is also theoretically interesting to ask whether letter-level processing can directly constrain sentence-level processing. For example, in the OB1-reader model of sentence reading (Snell, van Leipsig, et al., 2018), word length in number of letters has a direct impact on how different word identities are assigned to a specific position in a line of text.

| LEVELS OF PROCESSING | ASSOCIATED SPEEDED BINARY DECISION TASK                                    |                         |                    |
|----------------------|--|-------------------------|--------------------|
|                      | Task Name  | Yes - Response          | No - Response      |
| SENTENCE             | <b>Grammatical Decision</b><br>Is the word sequence grammatically correct? | The most crucial aspect | now it humanity me |
| (b) ↑                |  |                         |                    |
| WORD                 | <b>Lexical Decision</b><br>Is the letter string a word?                    | crucial                 | funchy             |
| (c) ↑                |  |                         |                    |
| LETTER               | <b>Alphabetical Decision</b><br>Is the character a letter?                 | u                       | γ                  |

Figure 33. A hierarchical model of reading with letter, word, and sentence level representations. The figure illustrates the central hypothesis to be tested in the present study – that letters connect with words (a) and words with sentences (b), but letters do not directly connect with sentences (c).

The over-arching theoretical framework guiding this research is inspired by the interactive-activation model (McClelland & Rumelhart, 1981; Reilly & Radach, 2006; Rumelhart, 1977; Rumelhart & McClelland, 1982). Here we apply this framework in its simplest form, referring uniquely to the different levels of processing that are postulated therein, and leaving aside some central assumptions about the nature of processing (e.g., parallel, cascaded, interactive). With respect to the present study, the key aspect of this framework is

that processing proceeds hierarchically, from one level to the next. This simple hierarchical model of reading is illustrated in Figure 1. We immediately acknowledge the deliberately oversimplistic nature of this architecture, which ignores the well-established role played by phonology and morphology in reading (e.g. Grainger, 2018). This over-simplification was necessary in order to generate clear predictions with respect to potential relations in performance across the different reading tasks.

This hierarchical architecture makes clear predictions about how processing at a given level should influence processing at the other levels. If letter-level processing is a key component of word recognition, and if the alphabetic decision task accurately reflects letter-level processing and the lexical decision task accurately reflects word-level processing, then the correlation between performance in these two tasks should be very high. The same reasoning holds for word-level and sentence-level processing, assuming that the grammatical decision task accurately reflects processing at the sentence level. Examining the cross-task correlations between alphabetic decision and lexical decision on the one hand, and lexical decision and grammatical decision on the other, will allow us to estimate the relative contributions of the different component processes to the overall task of reading.

Prior research has provided evidence for interesting parallels between letter-word processing on the one hand, and word-sentence processing on the other. The “word superiority effect” (Cattell, 1948; Reicher, 1969; Wheeler, 1970) refers to the higher accuracy in single letter identification when the target letter is presented in a word (e.g., the letter B in TABLE) compared with a pseudoword (e.g., the letter B in PABLE). More recently, a “sentence superiority effect” (Snell & Grainger, 2017; Wen et al., 2019) has been reported whereby identification of a single word target is better when that word is presented in the context of a correct sentence (e.g., target BOY in the sentence: “the boy runs fast”) compared with identification of the same word at the same position in an ungrammatical sequence (e.g., “runs

boy fast the”). A further point of comparison, of particular interest for the present work, concerns transposed-letter effects observed in the lexical decision task (it is harder to classify a nonword formed by transposing two letters in a real word (e.g., “gadren” derived from “garden”) compared with nonwords formed by substituting two letters (e.g., “gatsen”) (Blythe et al., 2014; Grainger, 2008; Perea & Lupker, 2004), and transposed-word effects in the grammatical decision task (it is harder to reject ungrammatical sequences formed by transposing two words in a correct sentence (e.g., “The white was cat big”) compared with sequences that cannot be transformed into a correct sentence by transposing any two words (e.g., “The white was cat slowly”) (Mirault et al., 2018, 2022). The important point, with respect to the present study, is the fact that similar phenomena can be observed across the letter-word and the word-sentence interfaces.

In the present study we used three tasks that have been previously applied to study letter, word, and sentence-level processing. Crucially, all three tasks require a speeded binary decision as to whether or not the target stimulus belongs to a well-defined category (letters, words, sentences) relative to a background of stimuli that are designed make the discrimination difficult. The present study was motivated by the hypothesis that these three tasks could provide comparable insights into letter, word, and sentence-level processing. The alphabetic decision task involves speeded letter vs. non-letter discrimination. In the present study we opted to use the pseudo-letters provided by Vidal et al. (2017) Vidal et al. as representing the best comparison relative to the pseudowords that are typically used in the lexical decision task. Direct proof that this task does reflect letter-level processing was provided by New and Grainger (2011), where robust effects of letter frequency were reported. The lexical decision task is quite simply the most widely used task to study single word recognition. The speeded version of the grammatical decision task is a more recent invention. Traditionally, grammaticality judgements, or well-formedness judgments, have been used by linguists in



paper-and-pencil investigations of the nature of syntactic knowledge. Mirault et al. (2018) used a speeded binary decision version of grammaticality judgments (termed the “grammatical decision task” by Mirault & Grainger, 2020) where they manipulated the nature of the ungrammatical sequences. Here we used the grammatical decision task as the sentence-level equivalent of lexical decisions to words and alphabetic decisions to letters. Thus, the ungrammatical sequences were chosen to be sentence-like in the same way that the pseudo-words were word-like, and the pseudo-letters were letter-like.

In the present study we set-out to examine cross-task correlations with performance in the three tasks described above with the same group of participants. This is the first time that such cross-task correlations have been examined across different levels of processing. Because the amount of shared processing is expected to be greater between two adjacent levels (letter-word; word-sentence) than between two non-adjacent levels (letter-sentence), we predicted that adjacent levels of processing (letter-word; word-sentence) should reveal stronger correlations than the correlation for non-adjacent levels of processing (letter-sentence). Participants were also tested in a speeded animal / non-animal decision task with drawings of familiar animals and inanimate objects. The aim here was to use performance on this non-reading task to partial out the contribution of common binary-decision making mechanisms in driving correlations across the three reading tasks. This specific task, compared with a simple stimulus detection task for example, has the advantage of involving greater depth of processing while using non-linguistic stimuli. That is, the animal decision task involves making speeded binary decisions based on semantic information (i.e., “animalness”) extracted from visual information, and we considered this to be the best average approximation to the amount of processing involved in the three reading tasks. Although alphabetic decision likely does not involve semantic information, we believe that the animal decision task is a good comparison point for this task to the extent that both tasks involve speeded binary decisions to simple visual stimuli. We

nevertheless note that we might not have come up with the most appropriate baseline (non-reading) task. It will therefore be important for future research to examine how the use of a different task here (or different tasks) might impact on the obtained results.

#### **4.1.4. Results**

The dataset consisted of 29520 observations: 4920 for Alphabetical Decision Task (hereafter, ADT), 9840 for Lexical Decision Task (LDT), 9840 for Grammatical Decision Task (GDT), and 4920 for Non-Reading Task (NRT). Firstly, we provide descriptive statistics on RTs and error rates to give an overview of performance in each task. Condition means for RTs and error rates are shown in Tableau 6. The main analysis of the lexical decision task included all words that were tested, including morphologically complex words. Additional analyses limited to only morphologically simple words showed exactly the same pattern.

##### **4.1.4.1. Response times (RTs)**

Prior to analysis of RTs incorrect responses (ADT = 2.26%, LDT = 3.56%, GDT = 11.35%, and NRT = 2.03%) and correct responses with RTs less than 300 ms (ADT = 0.06%, LDT = 0.11%, GDT = 0.03%, and NRT = 0.02%) were first excluded. Then trials with outliers, defined as RTs more than 2.5 SD above or below the participant's mean according to the type of response were excluded (ADT = 2.95%, LDT = 3.04%, GDT = 2.39%, and NRT = 3.17%). Means for correct "yes" and "no" responses per task are shown in Tableau 6, and the RT distributions for correct "yes" responses are shown in Figure 34.

RTs were found to increase as the task difficulty increased and correct yes-responses were faster than correct no-responses in all tasks. Moreover, the ratio of mean RTs across tasks revealed that it takes approximately the same amount of time to produce a correct yes-response in NRT and ADT (0.93), whereas this ratio increased as the task difficulty increased (ADT vs. LDT = 1.14, LDT vs. GDT = 2.05).

#### 4.1.4.2. Error rates

Means of error rates for “yes” and “no” responses per task are provided in Tableau 6.

The analysis of error rates revealed relatively few errors in NRT, ADT, and LDT (error rates below 5% for both correct yes- and no- responses), whereas larger error rates were observed in GDT (6.30% for correct yes-response, and 16.4% for correct no-response).

Tableau 6. Mean RTs (in milliseconds) for correct “yes” and “no” responses (standard errors in parentheses), and percentage of errors for yes and no-responses for each task.

|  | Task             |                  |                  |                   |
|--|------------------|------------------|------------------|-------------------|
|  | NRT              | ADT              | LDT              | GDT               |
| <b>Response Times</b>                  |                  |                  |                  |                   |
| Mean RTs for yes-responses             | 536 ms<br>(2.73) | 499 ms<br>(2.43) | 613 ms<br>(2.39) | 1098 ms<br>(5.92) |
| Mean RTs for no-responses              | 555 ms<br>(2.92) | 515 ms<br>(2.39) | 693 ms<br>(2.92) | 1345 ms<br>(7.70) |
| <b>Error Rates</b>                     |                  |                  |                  |                   |
| Percentage of errors for yes-responses | 2.48 %           | 2.93 %           | 4.04 %           | 6.30 %            |
| Percentage of errors for no-responses  | 1.59 %           | 1.59 %           | 3.07 %           | 16.4 %            |

Note. NRT = non-reading task; ADT = alphabetic decision task; LDT = lexical decision task; GDT = grammatical decision task.

#### 4.1.4.3. Cross-Task Correlations on RTs

Figure 34.A presents the Pearson correlations between standardized mean RTs per participant on correct yes-responses (N = 41) obtained in the different tasks computed with the Hmisc package in R (Frank & Harrell, 2022). As predicted, tasks assessing hierarchically adjacent processing showed a stronger correlation ( $r(\text{ADT}, \text{LDT}) = .83$ ;  $r(\text{LDT}, \text{GDT}) = .76$ ) than tasks assessing hierarchically distant processing ( $r(\text{ADT}, \text{GDT}) = .56$ ). All these correlations were significant ( $p < .001$ ). Moreover, NRT correlated more strongly with ADT ( $r = .78$ ) and LDT ( $r = .72$ ) than with GDT ( $r = .57$ ). This descriptive pattern was confirmed by the analysis of the statistical difference between correlations using the cocor R package (Diedenhofen Birk, 2016). The difference between correlations involving adjacent levels was

not statistically significant ( $r(\text{ADT}, \text{LDT}) = .83$  vs.  $r(\text{LDT}, \text{GDT}) = .76$ ,  $p = .35$ ), whereas the differences between correlations involving non-adjacent levels were significant ( $r(\text{ADT}, \text{GDT}) = .56$  vs.  $r(\text{ADT}, \text{LDT}) = .83$ ,  $p < .001$ ;  $r(\text{ADT}, \text{GDT}) = .56$  vs.  $r(\text{LDT}, \text{GDT}) = .76$ ,  $p < .01$ ).

These results could be explained by the fact that the binary-decision process shared by all tasks has a higher impact on tasks where the cognitive demand is lowest as in ADT and LDT in which letter and word processing is highly automatized as compared to GDT. In order to control for the impact of this binary decision process on correlations, we computed the partial correlations between ADT, LDT, GDT while controlling for the impact of NRT. Results (see Figure 34.B) revealed that all correlations were still significant ( $r(\text{ADT}, \text{LDT}) = .61$ ,  $p < .001$ ;  $r(\text{LDT}, \text{GDT}) = .61$ ,  $p < .001$ ). However, when the binary decision component was controlled for, the correlation between non-adjacent levels of processing was no longer significant ( $r(\text{ADT}, \text{GDT}) = .24$ ,  $p = .14$ ).

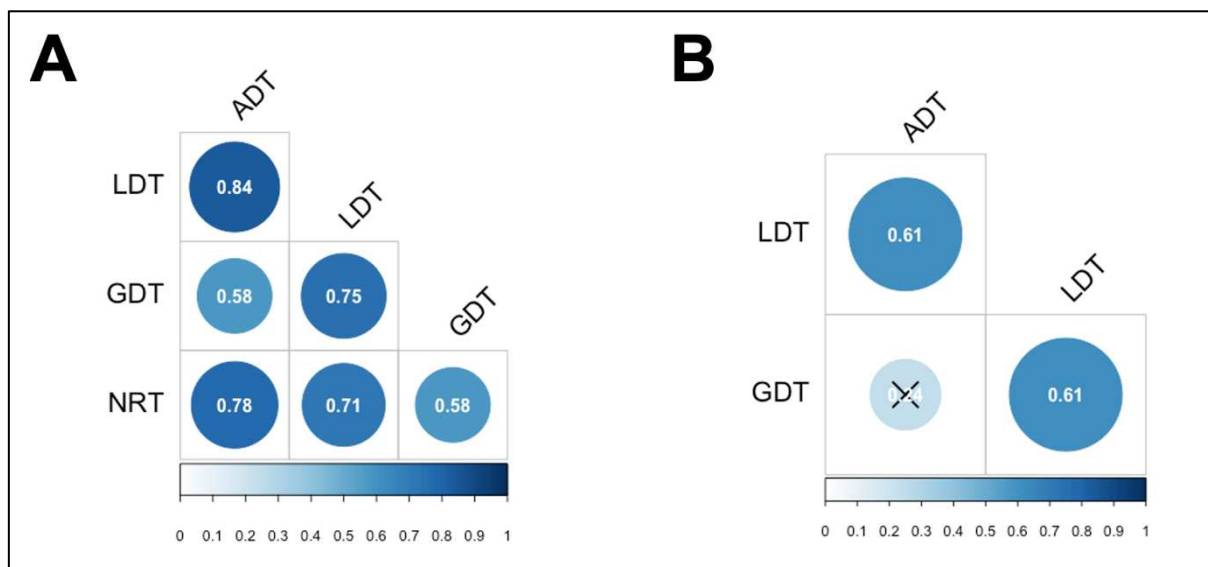


Figure 34. (A) Pairwise Pearson Correlations of standardized mean RTs for correct responses by participant in each task. (B) Partial Pearson Correlation of standardized mean RTs for correct responses by participant between ADT, LDT, and GDT while controlling for NRT (the partial correlation between GDT and ADT, marked by a cross, was not significant:  $p = .14$ ).

#### 4.1.4.4. Comparison of RT distributions

In order to provide an informal demonstration that performance in the four tasks is comparable in spite of differences in average RT, in Figure 35 we present the RT distributions

for these tasks. Although the form of the distributions changed across the four tasks, we suspect that this is linked to a change in task difficulty (change in overall mean RT) that then impacts on the spread of the distributions. The most straightforward explanation for this change in RT distribution is that increasing task difficulty causes a drop in the rate of information accumulation. A slower rate of information accumulation would lead to greater mean RT as well as flatter RT distributions as seen in the empirical distributions in Figure 35. In Figure 36 we provide an informal proof-of-concept that this might well be the case. To do so, we generated theoretical RT distributions using a simple random walk model with a fixed decision criterion, a fixed starting point, and a fixed variance for the random walk, thus only changing the slope of the random walk (i.e., the rate of information accumulation) in four simulations. The change in rate of information accumulation was hypothesized to reflect differences in the difficulty of each task, with the slope diminishing as the task becomes harder. The theoretical RT distributions shown in Figure 36 revealed that, with all else being equal, a decrease in slope of the random walk (from 0.25 to 0.1) mimicked the pattern seen in the empirical distributions with an increase in mean RT being associated with a flatter distribution.

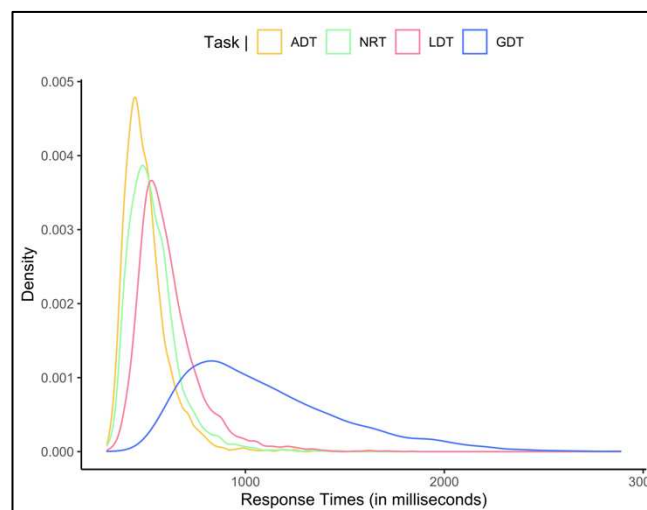


Figure 35. Distribution of RTs for correct “yes” responses in each task. NRT = non-reading task; ADT = alphabetic decision task; LDT = lexical decision task; GDT = grammatical decision task

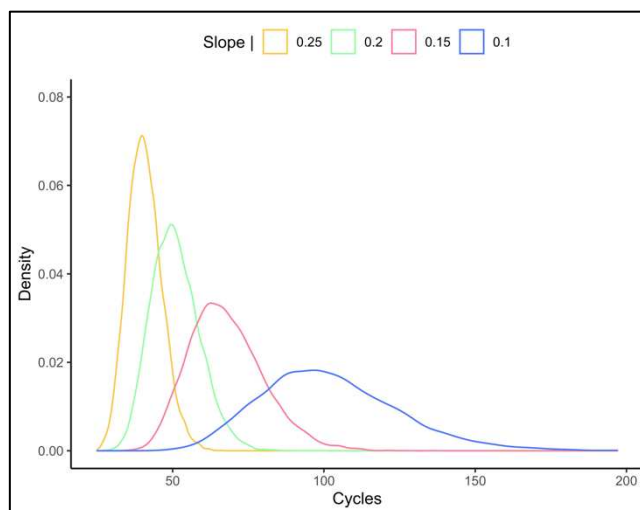


Figure 36. Distributions obtained with four different slopes applied to the same random walk model (starting point = 0;  $SD = 0.05$ ; response criterion = 10).

#### 4.1.5. Discussion

In the present study participants performed three tasks with visual stimuli that were hypothesized to primarily reflect processing at the letter, word, and sentence levels. The tasks were the alphabetic decision task (ADT), the lexical decision task (LDT), and the grammatical decision task (GDT). A fourth non-reading task (NRT), animal / non-animal classification, was included as a baseline comparison task for speeded binary decision making involving semantic processing but with non-linguistic visual stimuli (i.e., pictures of animals and inanimate objects). Prior research, summarized in the Introduction, suggested that these three reading tasks provide a good reflection of processing at the letter, word, and sentence levels, respectively. Moreover, the three tasks are highly comparable in that they all involve making a speeded binary decision that discriminates between a given target category (i.e., a “yes” response to letters, words, or sentences, depending on the task) against a background of pseudo-stimuli from the same category (pseudo-letters, pseudo-words, and ungrammatical word sequences). We therefore reasoned that comparing performance in these tasks within the same group of participants would inform about the relations between letter, word, and sentence-level processing during reading.

An initial qualitative appraisal of processing in the three reading tasks (see Tableau 6) revealed, unsurprisingly, an increase in task difficulty (longer RTs and more errors for both “yes” and “no” responses) as the complexity of the task increased – from ADT, to LDT, to GDT. Performance in the non-reading task (NRT) aligned more with the ADT, and the correlation analysis revealed the same pattern (see Figure 34). This pattern points to the addition of lexical (LDT) and sentence-level (GDT) processing on top of a speeded binary decision to simple visual stimuli as required in both the ADT and NRT.

We also compared the RT distributions in the four tasks and found that as mean RT increased there was a corresponding increase in the spread of the RT distribution (Figure 35). We then tested the hypothesis that one key underlying mechanism at play is the rate of accumulation of information in favor of a “yes” response, which would vary as a function of task difficulty, with slower accumulation rates as the task gets harder. Simulations performed on a simple random walk model provided support for this interpretation by showing that as the slope of the random walk decreased (with all other parameters held constant) then the mean and the spread of the RT distribution increased, thus providing a qualitative match to the pattern seen in the empirical distributions (see Figure 36).

However, the key findings of the present study concern the cross-task correlations that were found. These analyses revealed significant correlations across all tasks, albeit with weaker correlations between ADT and GDT, and between NRT and GDT. Crucially, when performance in the NRT was partialled out, the correlation between ADT and GDT was no longer significant. This absence of a correlation between non-adjacent levels of processing (i.e., letters and sentences) is clear evidence in favor of the central role for word recognition in the reading process. Moreover, without partially out performance in the NRT, statistical tests of the difference in size of correlations revealed that correlations across adjacent levels did not differ

significantly, whereas the contrasts between the adjacent level correlations and the non-adjacent level correlation were significant.

The present results provide support for the simple hierarchical model of reading shown in Figure 33, according to which word recognition plays a central role in the reading process, providing the key interface between initial letter-level processing and the final stages of sentence-level processing. Several models of text reading assign a central role to word recognition in the overall process of sentence reading (e.g., E-Z Reader; Reichle et al., 1998) and several also emphasize the critical role for orthographic processing (e.g., Glenmore: Reilly and Radach (2006); OB1-reader: Snell, van Leipsig, et al., 2018). The OB1-reader model (Snell, van Leipsig, et al., 2018) implements the principle according to which much reading behavior can be captured by orthographic processing, implemented as the processing of letters, letter-combinations, and orthographic words (see also Grainger, 2018). The present results clearly align favorably with this general approach to reading. Moreover, our results suggest that the alphabetic, lexical, and grammatical decision tasks provide a valuable window on processing at the letter, word, and sentence levels, and permit important comparisons to be made between processing (and the mechanisms driving such processing) at these different levels.

Finally, we note that one popular alternative to the hierarchical approach described in the present work, is the so-called “triangle model” of reading first proposed by Seidenberg and McClelland (1989). In this model, a non-hierarchical triangular architecture connects orthography with phonology on the one hand, and orthography with semantics on the other. One could conceivably extend this to the case of letters, words, and sentences as examined in the present work, in which case the model would predict equivalent correlations between processing times of letters and words, words and sentences, and between processing times of letters and sentences. However, it is important to stress that the key novelty introduced in the triangle model was in terms of learning mechanisms rather than mental chronometry. One could



also argue that the present findings point to a common mechanism underlying processing in all three reading tasks, and one possibility here is the notion of the “quality” of representations proposed by Perfetti and Hart (2002) for lexical processing. It is possible that the same notion of “quality” could apply to both letter-level and sentence-level representations. However, this “common mechanism” approach (and the same would apply to an “individual difference” explanation – i.e., better readers are better at performing all three reading tasks) would have to explain the differences in correlations we observed between adjacent and non-adjacent levels of processing.

#### ***4.1.6. Conclusions***

We investigated the hierarchical nature of processing across three levels (letter, word, sentence) thought to form the backbone of reading in an alphabetic script. Participants performed three tasks, each of which was hypothesized to reflect processing at one of the three levels. When partialling out performance in a non-reading speeded binary decision task (animal vs. non-animal classification of pictures) we found significant correlations in performance in adjacent levels of processing (letter-word; word-sentence) but not between non-adjacent levels (letter-sentence). Moreover, the size of the correlations differed significantly when comparing the correlations between adjacent and non-adjacent levels, but not when comparing adjacent levels. Overall, our results point to the central role of word identification processes in mediating between lower-level sublexical processing and higher-level sentence-level processing during reading comprehension.

#### ***4.1.7. Methods***

##### **4.1.7.1. Participants**

An online study consisting of three reading tasks (Alphabetical Decision, Lexical Decision, Grammatical Decision) and one non-reading task was programmed and hosted on a LabVanced server (Finger et al., 2017).

Forty-eight participants (28 female, 20 male) were recruited via Prolific, an online platform dedicated to the recruitment of participants. Prior to the beginning of the experiment, participants were informed that data would be collected anonymously, and they provided informed consent before the experiment was initiated. The study was approved by the ethics committee of Comité de Protection des Personnes SUD-EST IV (No. 17/051). The experiment was performed in accordance with relevant guidelines and regulations and in accordance with the Declaration of Helsinki.

The order of tasks was counterbalanced across participants. Seven participants were excluded because they failed to perform at a minimum of 75% correct responses in all tasks. In addition, participants completed a questionnaire at the beginning of the study asking for age, gender, mother tongue, and handedness. Self-report for age gave a median value of 25 years (range [18;31]). All participants reported to be native speakers of English and right-handed. The participant's English proficiency was assessed with a computerized version of the Lextale vocabulary test (Lemhöfer & Broersma, 2011) delivered before the four experimental tasks (minimum of Correct Response (CR): 62%, maximum of CR: 100%, mean of CR: 88%, standard error: 9%).

#### **4.1.7.2. General Procedure**

We applied the same general procedure for all four tasks. Stimuli were displayed in black on a gray background at the center of the screen. Each trial began with a 500 ms fixation cross followed by the stimulus, which remained visible for 3000 ms or until the participant responded. Participants were asked to press the “L” key for a “yes” response and the “S” key otherwise. Then, the screen remained blank for 800 ms before the next trial. All trials were presented in a randomized order. A short practice session was proposed to the participant before the beginning of each task. The duration of each task was about 6 minutes for ADT, 12 minutes

for LDT, 12 minutes for GDT, and 6 minutes for NRT, which amounted to a total of about 45 minutes for the entire experiment, including short breaks between each task.

#### **4.1.7.3. Design and Stimuli**

##### ***4.1.7.3.1. Alphabetic Decision Task (ADT)***

Twenty consonant letters and 20 pseudo-letters of the Brussels Artificial Characters Sets (Vidal et al., 2017) were selected. We used the pseudo-letters from the second set (BACS-2) in which each pseudo-letter was paired with a corresponding letter according to size, number of strokes, presence/absence of symmetry, number of junctions and number of terminations. Letters were presented in Lucida Sans Unicode font and pseudo-letters in BACS-2 sans serif font. Each letter and pseudo-letter was presented three times for each of the three different sizes (size 1: 100x100px, size 2: 120x120px, size 3: 140x140px) giving a total of 120 trials.

##### ***4.1.7.3.2. Lexical Decision Task (LDT)***

One hundred and twenty English words were selected among those used in the grammatically correct sequences of the grammatical decision task (see next experiment section). These words were tagged as adjectives, nouns, or verbs. Due to these selection criteria, some high-frequency words used in the GDT (such as determiners, articles, prepositions) were not used in the LDT. According to the Subtlex-UK database (van Heuven et al., 2014), words had a mean log-frequency of 2.17 (SD = 0.14) and a mean length of 6.05 letters (SD = 1.26 letters). Pseudowords were selected among those used in the English Lexicon Project (Balota et al., 2007) and were matched with words on number of letters. Stimuli were presented in 14pt Lucida Sans Unicode font.

#### **4.1.7.3.3. Grammatical Decision Task (GDT)**

Stimuli consisted of 240 English 4-word sequences, forming a grammatically correct structure such as “alcohol is a toxin.” The sequences were taken from the Google 4-gram English database (Michel et al., 2011), where the term “gram” refers to a word.

Stimulus selection was operated as follows. First, we chose the 4-grams for which all words figured in the Subtlex-UK database (van Heuven et al., 2014). Then, we excluded the 4-grams which contained adjectives, nouns, or verbs with less than 3 letters or more than 8 letters and whose frequency lay +/- 1.75 SD beyond the average word frequency. Moreover, we ensured that the mean word lemma log<sub>10</sub> frequency by 4-gram fell within the [1;1] standard interval. Finally, we kept the 4-grams with Standard Frequency Index (SFI; Carroll, 1970) values ranging between 1.83 and 3.83, and we removed 4-grams ending with determiners, articles, prepositions, postpositions, and particles. Two hundred and forty 4-word sequences were retained for the study. One hundred and twenty 4-grams were used as a correct grammatical sequence. The 120 remaining 4-grams were used to form ungrammatical sequences by substituting one or several words with another valid English word of the same length. This led to 120 grammatical and 120 ungrammatical sequences which were randomly presented to participants. Stimuli were presented in 14 pt Lucida Sans Unicode font.

#### **4.1.7.3.4. Non-Reading Task (NRT)**

Forty black and white drawings were selected from the MultiPic database (Duñabeitia et al., 2018). MultiPic is a normative database of 750 pictures of concrete concepts dedicated for the investigation of language, visual, memory and/or attention processes. Among these 40 drawings, 20 represented a living thing (e.g., a penguin), and 20 represented a nonliving thing (e.g., an umbrella). Living and nonliving drawings were matched on all variables available in MultiPic: measures of name agreement, the percentage of valid responses, the number of

different responses, the percentage of unknown responses, the percentage of idiosyncratic responses, and visual complexity. Drawings were presented three times within three different sizes (sizes were matched on the size of letter and pseudo-letters used in the alphabetic decision task), giving 120 trials.

## **4.2. Étude 4. Étude de la coévolution de l'encodage orthographique des unités lettre et phrase au cours de l'apprentissage de la lecture**

### ***4.2.1. Objectifs***

L'une des principales caractéristiques de la lecture experte résiderait dans la capacité à encoder l'identité de plusieurs mots simultanément (Grainger, Dufau, et al., 2016). Cette habilité serait permise par un mécanisme d'intégration spatiale permettant d'encoder simultanément les informations orthographique (Grainger et al., 2014), syntaxique (Snell, Meeter, et al., 2017), morphologique (Grainger et al., 2021) et sémantique (Snell, Declerck, et al., 2017) de plusieurs mots lors d'une unique fixation. L'activité de ce mécanisme peut être mise en évidence dans une tâche de décision lexicale à lettres flanquées (Dare & Shillcock, 2013). Dans cette tâche, les participants parviennent plus rapidement à effectuer une décision lexicale lorsque le mot cible est flanqué d'informations orthographiquement reliées (e.g., ro rock ck) que lorsqu'elles ne le sont pas (e.g., st rock ep). Le mécanisme d'intégration spatiale serait utilisé dans des conditions de lecture naturelle pour construire rapidement une représentation élémentaire de la structure syntaxique de la phrase qui permettrait en retour de contraindre les processus d'identification des mots (Declerck et al., 2020). La construction de cette représentation peut être observée à travers deux principaux paradigmes expérimentaux dédiés à l'investigation du traitement en parallèle des mots : le paradigme de présentation visuelle parallèle (Rapid Parallel Visual Presentation paradigm – RPVP ; Asano & Yokosawa, 2011) et la tâche de décision grammaticale (Mirault & Grainger, 2020).

Le paradigme RPVP consiste à présenter brièvement une séquence de mot qui est ensuite masquée. La position d'un des mots de la séquence est ensuite signalée et les participants doivent reporter son identité. Les résultats révèlent que les participants reportent plus facilement le mot cible lorsque celui-ci se trouve dans une séquence grammaticale que dans une séquence non-grammaticale (Snell & Grainger, 2017; Wen et al., 2019). Par exemple, l'identification du

mot cible "grand" est meilleure dans la séquence grammaticale "un grand portail blanc" que dans la séquence non-grammaticale "portail grand blanc un". Selon Snell et Grainger (2017), cet effet de "supériorité de la phrase" suggère que les participants extraient l'identité des mots en parallèle afin de générer rapidement une représentation syntaxique élémentaire de la séquence de mots. En retour, cette représentation contraindrait le processus d'identification des mots en cours en générant des attentes sur les propriétés syntaxiques d'un mot à une position donnée. Dans l'exemple précité, l'identification du mot "grand" à la position 2 serait facilitée dans un contexte respectant les conventions syntaxiques selon lesquelles l'adjectif est flanqué d'un déterminant (position 1) et d'un nom (position 2) plutôt que dans un contexte violant ces conventions (i.e., deux adjectifs se suivant dans la séquence non-grammaticale). Les résultats obtenus avec la tâche de décision grammaticale supportent également ces conclusions. Dans cette tâche, une séquence de mots est brièvement présentée avant d'être masquée. Les participants doivent alors déterminer si la séquence est grammaticale ou non. Mirault et Grainger (2020) ont montré que les décisions grammaticales étaient plus précises et plus rapides pour les séquences grammaticales que pour les séquences non-grammaticales. Ce résultat suggère que les participants produisent leur réponse sur la base d'une analyse complète de la structure syntaxique de la séquence plutôt que sur la détection de combinaisons illégales. Cette analyse serait permise par la construction d'une représentation syntaxique élémentaire de la séquence basée sur l'extraction parallèle de l'identité des mots la composant.

La mise en place de cette habilité au cours de l'apprentissage de la lecture n'a été que très peu explorée. Les données actuelles permettent d'affirmer que les apprentis lecteurs disposent très précocement des mécanismes nécessaires à la construction rapide d'une représentation syntaxique de la phrase. Dès leurs premières années d'apprentissage, les apprentis lecteurs sont capables de traiter les lettres en parallèle au sein du mot (e.g., Aghababian & Nazir, 2000; Varga et al., 2020) et d'intégrer spatialement de l'information

orthographique à travers plusieurs mots (Snell et al., 2021). Massol et Grainger (2021) ont montré que ces mécanismes étaient efficaces à partir de la 3<sup>ème</sup> année d'apprentissage de la lecture (CE2). Les auteurs ont également observé que plus le niveau de lecture des enfants était élevé, meilleure était la précision du report du mot cible dans une tâche RPVP, indépendamment de la grammaticalité de la séquence. Ce résultat suggère que les capacités d'identification du mot écrit est un facteur critique du traitement en parallèle des mots pendant la lecture.

En s'inscrivant dans les perspectives ouvertes par Massol et Grainger (2021), la présente étude visait deux objectifs : 1) décrire la trajectoire développementale du traitement en parallèle des mots et 2) déterminer en quoi ce traitement est contraint par les capacités d'identification du mot écrit. Afin de répondre à ces deux objectifs, trois groupes d'apprentis lecteurs de la 2<sup>ème</sup> à la 6<sup>ème</sup> année d'apprentissage (CE1-6<sup>ème</sup>) ont réalisé une tâche de décision lexicale et une tâche de décision grammaticale. Ces tâches visaient à évaluer respectivement les capacités d'identification du mot écrit et la capacité à traiter plusieurs mots en parallèle.

#### **4.2.2. Méthode**

##### **4.2.2.1. Participants**

Cent-cinquante enfants d'école primaire (2A = 56, 4A = 38) et de collège (6A = 56) ont été recrutés dans des établissements scolaires situés en Haute-Savoie (France). Chaque enfant a réalisé deux tâches de lecture dans laquelle la durée de présentation du stimulus était manipulée : une tâche de décision lexicale (Lexical Decision Task, ci-après LDT) et une tâche de décision grammaticale (Grammatical Decision Task, ci-après GDT). Leur niveau d'efficacité en lecture a été évalué à l'aide du test de lecture de *L'Alouette* (Lefavrais, 2005). Tous les participants étaient de langue maternelle française et avaient une vision normale ou corrigée à la normale. La session d'expérimentation s'est déroulée à la fin de l'année scolaire, en juin. Un consentement éclairé a été fourni par les parents de chaque enfant avant l'expérimentation. L'étude a été approuvée par le comité d'éthique du Comité de protection des



personnes SUD-EST IV (n°17/051) et a été réalisée conformément aux directives et règlements inhérents à la Déclaration d’Helsinki.

#### **4.2.2.2. Stimuli**

##### ***4.2.2.2.1. Tâche de décision lexicale (LDT)***

Cent-soixante mots français ont été sélectionnés parmi ceux utilisés dans les séquences de mots de la tâche de décision grammaticale (voir la section suivante). Ces mots étaient étiquetés comme adjectifs, noms communs, ou verbes. Quatre-vingts d’entre eux ont été utilisés pour les besoins de la tâche de décision lexicale. Selon la base de données Manulex (Lété et al., 2004), les mots avaient une fréquence moyenne par million de 99.95 (SD = 265.76) et une longueur moyenne de 6 lettres (SD = 1.41). Les pseudo-mots ont été obtenus en transposant les lettres de 80 mots sélectionnés restants.

##### ***4.2.2.2.2. Tâche de décision grammaticale (GDT)***

L’ensemble des stimuli comprenait 160 séquences de quatre mots français formant une structure grammaticalement correcte telle que « le troupeau du berger ». Ces séquences ont été extraites de la version française de la base de données Google-4-Gram (Michel et al., 2011). Tout d’abord, seules les séquences dont l’ensemble des mots avaient une fréquence lexicale répertoriée au Grade 1 dans Manulex (Lété et al., 2004) ont été retenues. Ce critère visait à s’assurer que les enfants étaient régulièrement confrontés aux mots composant les séquences. Ensuite, les séquences contenant des mots d’une longueur inférieure à trois lettres ou supérieure à huit lettres, étiquetés comme adjectifs, noms communs ou verbes, et dont la fréquence lexicale s’écarterait de plus ou moins un écart-type de la fréquence lexicale moyenne ont été exclues. Les séquences étaient également exclues si les mots restants comprenaient moins de deux lettres ou plus de six lettres, quelle que soit leur catégorie. Les séquences se terminant par des mots étiquetés comme déterminants, articles, prépositions, postpositions ou particules ont également

été exclues. Enfin, seules les séquences dont l'indice de fréquence standard (SFI; (Caroll, 1970) était compris entre 1.91 et 3.91, et dont la fréquence lexicale moyenne de l'ensemble des mots, exprimée en  $\log_{10}$ , se trouvait dans l'intervalle standard [1,1] ont été conservées. Cent-soixante séquences de quatre mots ont ainsi été retenues pour l'étude. Quatre-vingts séquences ont été utilisées comme séquence grammaticale correcte. Les 80 séquences restantes ont été utilisées pour former des séquences non-grammaticales en transposant un ou plusieurs mots.

#### **4.2.2.2.3. *Design expérimental***

Dans chacune des tâches, quatre durées d'affichage ont été utilisées (LDT : 83, 150, 233 ou 300 ms ; GDT : 150, 300, 450 ou 700 ms). Un design en carré latin a été utilisé pour présenter les items dans chaque durée de présentation à travers les participants.

#### **4.2.2.2.4. *Procédure***

La même procédure a été utilisée pour les deux tâches à l'exception des temps d'affichage du stimulus (cf. Figure 37). Les stimuli étaient affichés au centre de l'écran en police Courier de couleur noire et de taille 16 pt sur un fond gris. Chaque essai débutait avec une croix de fixation pendant 1000 ms. Puis, celle-ci était remplacée par le stimulus (mot vs phrase) pendant le temps d'affichage de la condition expérimentale considérée (LDT : 83, 150, 233 ou 300 ms ; GDT : 150, 300, 450 ou 700 ms). Le stimulus était ensuite remplacé par un point d'interrogation (?) pendant 5000 ms ou jusqu'à la réponse du participant. Les participants devaient répondre le plus rapidement et plus justement possible en appuyant sur la touche L pour la réponse « oui » et sur la touche S pour la réponse « non » (et *vice versa* pour les participants gauchers). Pour chaque tâche, l'ensemble des 160 items était divisé en cinq blocs de 32 items. L'ordre de présentation des blocs et des items à l'intérieur des blocs était aléatorisé. La durée de chacune des tâches était d'environ huit minutes.

Avant la réalisation de l'expérience, les deux tâches ont été expliquées collectivement par l'expérimentateur aux enfants à l'aide d'un support papier. L'expérimentateur donnait des exemples de mots, de non-mots, de séquences grammaticales et de séquences non grammaticales auxquels les enfants allaient pouvoir être confrontés. Les enfants étaient invités à répondre oralement si la chaîne de lettres était un mot ou un non-mot (LDT) ou si la séquence de mots était grammaticale ou non (GDT). L'expérimentateur laissait les enfants exprimer leur opinion avant de fournir la réponse correcte. Des exemples étaient donnés jusqu'à ce que l'expérimentateur soit sûr que les enfants aient correctement compris la tâche. De plus, une session d'entraînement était proposée aux enfants avant le début de chaque tâche. Pendant cet entraînement, l'expérimentateur était attentif à la position de l'enfant devant l'écran et son utilisation correcte du clavier pour donner ses réponses.

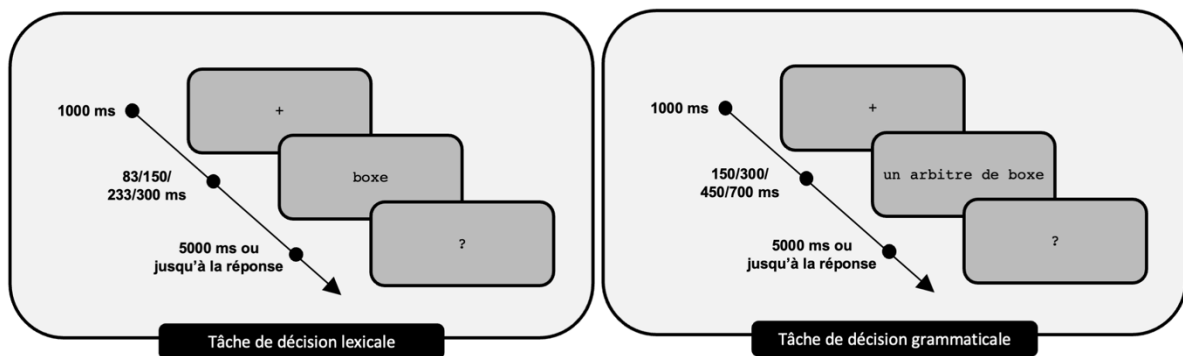


Figure 37. Illustration des procédures expérimentales utilisées dans la tâche de décision lexicale (à gauche) et la tâche de décision grammaticale (à droite).

### 4.2.3. Résultats

Les données brutes ont été traitées à l'aide du logiciel R (R Core Team, 2020). Au total 150 participants ont été inclus dans les analyses : 56 enfants de 2<sup>ème</sup> année (2A), 38 enfants de quatrième année (4A) et 56 enfants de 6<sup>ème</sup> année (6A). Pour chaque participant et chaque tâche orthographique, 20 observations ont été recueillies par durée de présentation. La matrice de données totales comprenait 24.000 observations par tâche. Dans un premier temps, une analyse de détection du signal a été réalisée pour décrire l'évolution de la sensibilité en fonction de la

durée de présentation du stimulus cible dans chacune des tâches. Puis, une analyse de classification a été réalisée sur la base de la sensibilité moyenne de chaque participant dans chacune des tâches afin d'identifier des profils de performances.

#### **4.2.3.1. Analyse de la performance en fonction de la durée d'affichage**

Dans un premier temps, nous avons calculé les index de sensibilité ( $d'$ ) et de biais ( $c$ ) à partir du pourcentage de détections correctes et de fausses alarmes. Pour chaque tâche, une valeur de  $d'$  et de  $c$  a été obtenue en fonction du temps d'affichage et du niveau scolaire. La Figure 38 représente les valeurs de  $d'$  et de  $c$  pour chaque durée de présentation et chaque tâche. Les performances des participants par condition expérimentale et en fonction du type d'essai (détections correctes, réjections correctes, fausses alarmes, omissions) sont reportées dans le Tableau 7.

##### **4.2.3.1.1. Tâche de décision lexicale (LDT)**

Dans la tâche de décision lexicale, les stimuli mots étaient considérés comme le signal alors que les stimuli pseudo-mots étaient considérés comme le bruit. L'analyse des index de sensibilité ( $d'$ ) a révélé que la sensibilité moyenne augmentait avec le niveau scolaire (2A = 0.72, 4A = 2.20, 6A = 2.66). L'allongement de la durée de présentation permettait d'augmenter la sensibilité<sup>20</sup> pour chaque niveau scolaire ( $\Delta 2A = .35$ ,  $\Delta 4A = .88$ ,  $\Delta 6A = .60$ ). L'analyse du biais de réponse a révélé que les participants, quel que soit leur niveau scolaire, avaient en moyenne un faible biais<sup>21</sup> en faveur des réponses "mots" (2A = -0.26, 4A = -0.24, 6A = -0.33). Ce biais demeurerait stable avec l'allongement des durées de présentation pour l'ensemble des niveaux scolaires ( $\Delta 2A = 0.08$ ,  $\Delta 4A = 0.09$ ,  $\Delta 6A = 0.10$ ).

---

<sup>20</sup> L'amélioration de la sensibilité est ici mesurée par la différence des index de sensibilité entre la durée de présentation la plus longue et la durée de présentation la plus courte.

<sup>21</sup> Une valeur de -1 (respectivement +1) du biais de réponse indique un déplacement du critère de réponse d'un écart-type en faveur des réponses "signal".

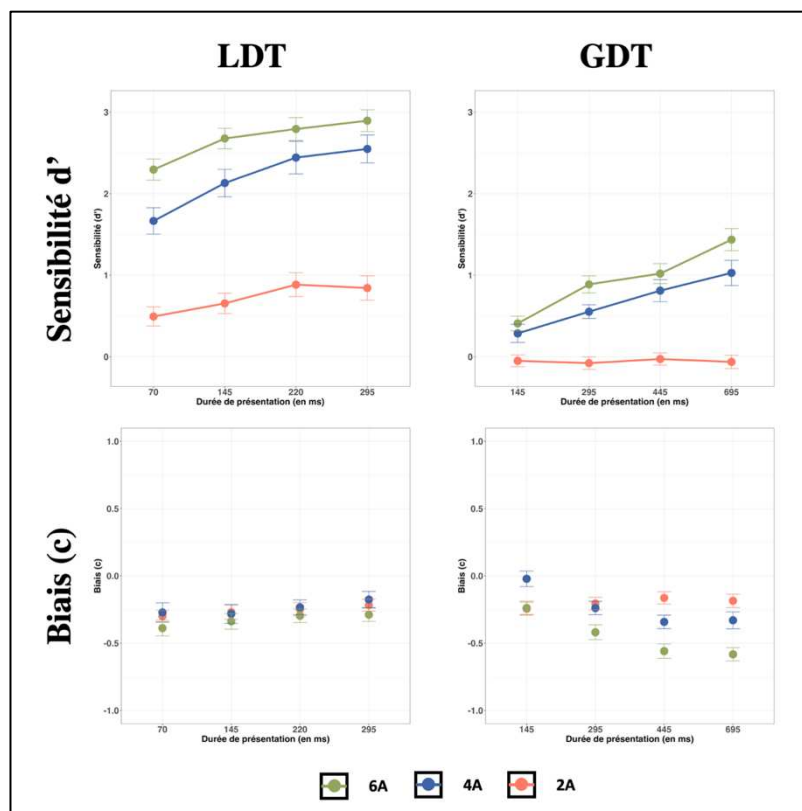


Figure 38. Évolution des index de sensibilité ( $d'$ ) et de biais ( $c$ ) en fonction de la durée de présentation et du niveau scolaire (2A : 2<sup>ème</sup> année ; 4A : 4<sup>ème</sup> année ; 6A : 6<sup>ème</sup> année).

Tableau 7. Pourcentage moyen de réponse (erreur type entre parenthèses) pour chaque type de réponse (DC : détections correctes, RC : rejets corrects, FA : fausses alarmes et O : omissions) en fonction de la durée d'affichage (en italique les durées d'affichage utilisées dans la tâche GDT) et du niveau scolaire (2A : 2<sup>ème</sup> année, 4A : 4<sup>ème</sup> année ; 6A : 6<sup>ème</sup> année).

| Groupe | LDT           |                 |                 |                 | GDT             |                 |                 |                 |                 |                 |
|--------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|        | Durée (en ms) | DC              | RC              | FA              | O               | Durée (en ms)   | DC              | RC              | FA              | O               |
| 2A     | 83            | 68.30<br>(2.17) | 47.90<br>(2.53) | 52.1<br>(2.53)  | 31.70<br>(2.17) | 150             | 57.10<br>(2.29) | 39.90<br>(1.63) | 60.10<br>(1.63) | 42.90<br>(2.29) |
|        | 150           | 68.00<br>(2.43) | 52.4<br>(2.35)  | 47.6<br>(2.35)  | 32.00<br>(2.43) | 300             | 55.60<br>(2.25) | 41.20<br>(1.86) | 58.80<br>(1.86) | 44.40<br>(2.25) |
|        | 233           | 71.30<br>(2.44) | 56.50<br>(2.83) | 43.50<br>(2.83) | 28.70<br>(2.44) | 450             | 55.40<br>(2.02) | 43.80<br>(2.21) | 56.20<br>(2.21) | 44.60<br>(2.02) |
|        | 300           | 71.00<br>(2.19) | 55.60<br>(2.93) | 44.40<br>(2.93) | 29.00<br>(2.19) | 700             | 55.50<br>(2.19) | 42.30<br>(2.29) | 57.70<br>(2.29) | 44.50<br>(2.19) |
|        | 4A            | 83              | 84.00<br>(1.45) | 66.90<br>(3.56) | 33.10<br>(3.56) | 16.00<br>(1.45) | 150             | 56.00<br>(2.94) | 54.60<br>(2.67) | 45.40<br>(2.67) |
| 4A     | 150           | 88.20<br>(1.70) | 73.90<br>(3.47) | 26.10<br>(3.47) | 11.80<br>(1.70) | 300             | 68.40<br>(1.89) | 51.00<br>(2.52) | 49.00<br>(2.52) | 31.60<br>(1.89) |
|        | 233           | 89.10<br>(1.63) | 78.00<br>(2.79) | 22.00<br>(2.79) | 10.90<br>(1.63) | 450             | 73.80<br>(2.58) | 51.80<br>(2.37) | 48.20<br>(2.37) | 26.20<br>(2.58) |
|        | 300           | 90.60<br>(1.14) | 80.60<br>(2.77) | 19.40<br>(2.77) | 9.37<br>(1.14)  | 700             | 76.10<br>(2.89) | 55.90<br>(3.04) | 44.10<br>(3.04) | 23.90<br>(2.89) |
|        | 6A            | 83              | 90.70<br>(1.12) | 73.6<br>(2.64)  | 26.40<br>(2.64) | 9.30<br>(1.12)  | 150             | 65.50<br>(2.25) | 48.80<br>(2.32) | 51.20<br>(2.32) |
| 6A     | 150           | 93.00<br>(.86)  | 79.10<br>(2.36) | 20.90<br>(2.36) | 6.95<br>(.86)   | 300             | 76.50<br>(2.00) | 50.80<br>(2.34) | 49.20<br>(2.34) | 23.50<br>(2.00) |
|        | 233           | 92.40<br>(1.24) | 82.00<br>(2.20) | 18.00<br>(2.20) | 7.62<br>(1.24)  | 450             | 82.00<br>(1.53) | 48.60<br>(2.63) | 51.40<br>(2.63) | 18.00<br>(1.53) |
|        | 300           | 93.60<br>(.88)  | 83.00<br>(2.05) | 17.00<br>(2.05) | 6.36<br>(.88)   | 700             | 86.80<br>(1.43) | 54.10<br>(2.86) | 45.90<br>(2.86) | 13.20<br>(1.43) |

#### **4.2.3.1.2. Tâche de décision grammaticale**

Dans la tâche de décision grammaticale, les séquences grammaticales étaient considérées comme le signal tandis que les séquences non-grammaticales étaient considérées comme le bruit. Comme pour la LDT, l'analyse des index de sensibilité ( $d'$ ) a révélé que la sensibilité moyenne augmentait avec le niveau scolaire ( $2A = -0.05$ ,  $4A = 0.67$ ,  $6A = 0.94$ ). L'allongement de la durée de présentation a permis d'augmenter la sensibilité des enfants de 4<sup>ème</sup> et de 6<sup>ème</sup> année ( $\Delta 4A = 0.74$ ,  $\Delta 6A = 1.03$ ) mais n'a pas permis d'augmenter celle des enfants de 2<sup>ème</sup> année qui était proche de 0 quel que soit la durée de présentation utilisée ( $150ms = -0.05$ ,  $300ms = -0.08$ ,  $450ms = -0.03$ ,  $700ms = -0.06$ ). L'analyse du biais de réponse a révélé que les participants, quel que soit leur niveau scolaire avaient en moyenne un faible biais en faveur des réponses "grammaticales" ( $2A = -0.20$ ,  $4A = -0.23$ ,  $6A = -0.45$ ). Ce biais demeurait stable avec l'allongement des durées de présentation pour les enfants de 2<sup>ème</sup> année ( $\Delta 2A = 0.05$ ), alors qu'il augmentait pour les enfants de 4<sup>ème</sup> et 6<sup>ème</sup> année ( $\Delta 4A = 0.31$ ,  $\Delta 6A = 0.34$ ).

#### **4.2.3.2. Analyse de classification**

##### **4.2.3.2.1. Procédure de classification**

Une analyse de classification a été réalisée à l'aide du logiciel R (R Core Team, 2020). En suivant les recommandations d'études antérieures (Hayenga & Corpus, 2010; Rosenzweig & Wigfield, 2017; Vansteenkiste et al., 2009; Wang, 2021), les participants ont été classifiés sur la base de leur sensibilité<sup>22</sup> ( $d'$ ) aux tâches LDT et GDT en utilisant une procédure de classification séquentielle à deux étapes. La première étape consistait à appliquer une classification ascendante hiérarchique utilisant la méthode de Ward implémentée à l'aide du

---

<sup>22</sup> Dans cette analyse, les index de sensibilité ont été calculés sans prendre en compte les conditions expérimentales de durées de présentation.

package R *stats* (R Core Team, 2020). La seconde étape consistait à appliquer l'analyse de classification utilisant l'algorithme k-means proposé par Hartigan et Wong (1979) et implémenté dans le même package R. Pour ces analyses, les index de sensibilité ( $d'$ ) obtenus dans chaque tâche ont été transformés en z-score.

La classification ascendante hiérarchique visait à déterminer le nombre de clusters appropriés. Cette méthode étant sensible aux valeurs aberrantes (Vansteenkiste et al., 2009; Wormington et al., 2012), nous avons vérifié, pour chaque tâche, qu'aucun participant avait une valeur de sensibilité s'écartant de +/- 3SD. L'observation du dendrogramme obtenu a révélé que la solution de classification à deux clusters était la plus valide. Cette observation était conforme à l'estimation du nombre de clusters fournie par la méthode d'Elbow et le coefficient de silhouette.

L'analyse de classification par k-means visait, quant à elle, à affiner la solution de classification retenue. Dans cette analyse, le chercheur spécifie le nombre de clusters à utiliser pour la classification sur la base des résultats obtenus à l'aide de la classification ascendante hiérarchique (ici N=2). La stabilité de la classification obtenue a été éprouvée en utilisant un rééchantillonnage par bootstrap implémenté à l'aide de la fonction *clusterboot* du package R *fpc* (Hennig, 2010)<sup>23</sup>. Le coefficient de Jaccard obtenu à l'aide de la fonction *clusterboot* pour chacun des clusters était élevé (>.88) témoignant de la stabilité de la solution à deux clusters.

Le Tableau 8 résume les caractéristiques des clusters obtenus.

Tableau 8. Caractéristiques des deux clusters obtenus sur la base du niveau de lecture (score CTL obtenu à L'Alouette), des index de sensibilités ( $d'$ ) obtenus à chaque tâche (écart-type entre parenthèses, et étendue entre crochets) et du niveau scolaire (2A : 2<sup>ème</sup> année, 4A : 4<sup>ème</sup> année, 6A : 6<sup>ème</sup> année).

| Clusters | CTL à       | Sensibilité ( $d'$ ) |                | Effectif par niveau scolaire |    |    |
|----------|-------------|----------------------|----------------|------------------------------|----|----|
|          | L'Alouette  | LDT                  | GDT            | 2A                           | 4A | 6A |
| C1       | 166 (87)    | .73 (.70)            | .02 (.41)      | 50                           | 14 | 11 |
|          | [50 - 408]  | [-.66 - 1.92]        | [-1.39 - 1.25] |                              |    |    |
| C2       | 309 (77)    | 2.72 (.62)           | .88 (.59)      | 6                            | 24 | 45 |
|          | [114 - 487] | [1.69 - 4.29]        | [-.23 - 2.38]  |                              |    |    |

<sup>23</sup> Pour une description complète de l'algorithme, voir (Hennig, 2007).

#### 4.2.3.2.2. *Description de la solution de classification*

La solution de classification retenue fait émerger deux clusters qui diffèrent significativement en termes de niveau de lecture ainsi qu'en termes de sensibilité aux deux tâches. Les participants du cluster n°1 avaient en moyenne un score CTL significativement plus faible ( $M = 166$ ,  $SD = 87$ ) que les participants du cluster n°2 ( $M = 309$ ,  $SD = 77$  ;  $t(148) = 10.66$ ,  $p < .001$ ) . Par ailleurs, les participants du cluster n°1 avaient une plus faible sensibilité que les participants du cluster n°2 aux tâches de décision lexicale ( $C1 = .73$  vs.  $C2 = 2.72$ ,  $t(148) = 18.50$ ,  $p < .001$ ) et de décision grammaticale ( $C1 = .02$  vs.  $C2 = .88$ ,  $t(131.7) = 10.45$ ,  $p < .001$ ). Considérant que les participants du cluster n°1 ont une sensibilité moyenne à la tâche GDT proche de 0, ce cluster sera appelé cluster de "Lecture Séquentielle de Mot" (cluster LSM, ci-après), alors que le cluster n°2 sera appelé cluster de "Lecture Parallèle de Mot" (cluster LPM, ci-après).

L'analyse de la composition des clusters révèle que les enfants de 2<sup>ème</sup> année appartiennent majoritairement (89% ; 50/56) au cluster LSM, alors que les enfants de 6<sup>ème</sup> année appartiennent majoritairement au cluster LPM (80% ; 45/56). La répartition est moins déséquilibrée chez les enfants de 4<sup>ème</sup> année où 37% (14/38) appartiennent au cluster LSM et 63% (24/38) au cluster LPM. Dans ce groupe, la partition entre les deux clusters semble particulièrement bien expliquée par le niveau de lecture : 85% des enfants ayant un niveau de lecture supérieur au niveau moyen attendu à la fin de l'école primaire ( $M = 268$ ,  $SD = 82$ , voir (Lefavrais, 2005) appartiennent au cluster LPM, alors que 61% des enfants ayant un niveau de lecteur inférieur au niveau moyen attendu à la fin de l'école primaire appartiennent au cluster LSM. Ce résultat est proche de celui observé sur l'ensemble de l'échantillon : 85% des enfants ayant un niveau de lecture supérieur à celui attendu en 5<sup>ème</sup> année appartiennent au cluster LPM,



alors que 76% des enfants ayant un niveau de lecteur inférieur à celui attendu en 5<sup>ème</sup> année appartiennent au cluster LSM. La Figure 39 illustre ces observations.

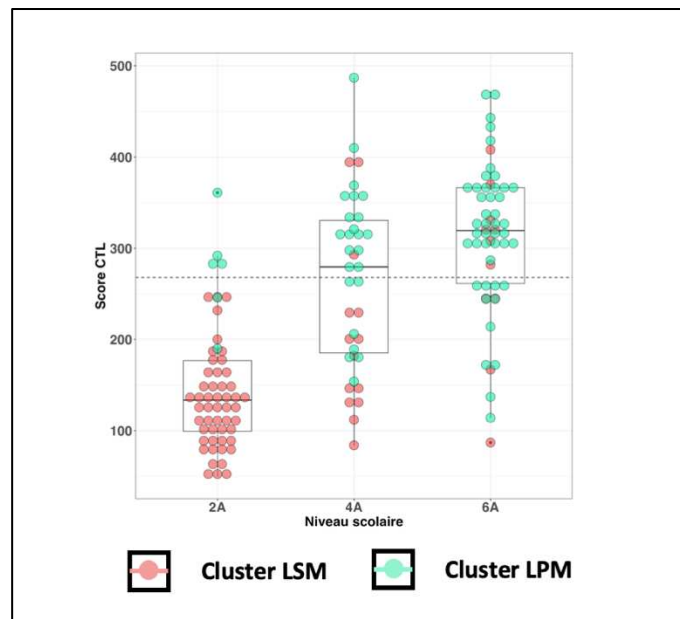


Figure 39. Dispersion au sein des clusters de Lecture Séquentielle de Mot (LSM, en rouge) et de Lecture Parallèle de Mot (LPM, en vert) en fonction du niveau scolaire (en abscisse) et du niveau de lecture (en ordonnée).

#### 4.2.3.3. Analyse de la relation de performance entre les tâches LDT et GDT.

Les analyses de classification décrites ci-dessus ont été utilisées pour explorer la relation de performance des enfants entre les tâches LDT et GDT. Cette relation est illustrée dans la Figure 41 qui montre l'évolution de la sensibilité à la tâche GDT en fonction de la sensibilité à la tâche LDT. On observe que cette relation s'exprime différemment selon le cluster considéré : l'amélioration de la sensibilité dans la tâche GDT semble plus fortement corrélée à l'amélioration de la sensibilité dans la tâche LDT dans le cluster LPM que dans le cluster LSM. Cette observation a été corroborée par le test de Chow (Chow, 1960) qui indiquait que la série de données était mieux expliquée par l'utilisation de deux relations linéaires que par une seule ( $F(3,144) = 15.86, p < .01$ ). Ainsi, si les coefficients de corrélation linéaire étaient significatifs pour les deux clusters (tous les  $p < .001$ ), celui du cluster LPM ( $r = 0.64$ ) était significativement

Figure 40. Représentation de la relation entre les indices de sensibilité à la tâche de décision lexicale et les indices de sensibilité à la tâche de décision grammaticale en fonction de l'appartenance au cluster de Lecture Séquentielle de Mot (LSM, en rouge) ou au cluster de Lecture Parallèle de Mot (LPM en vert).

plus élevé que celui du cluster LSM ( $r = 0.38$ ) selon le test de Zou (Zou, 2007) implémenté par le package R *cocor* (Diedenhofen Birk, 2016).

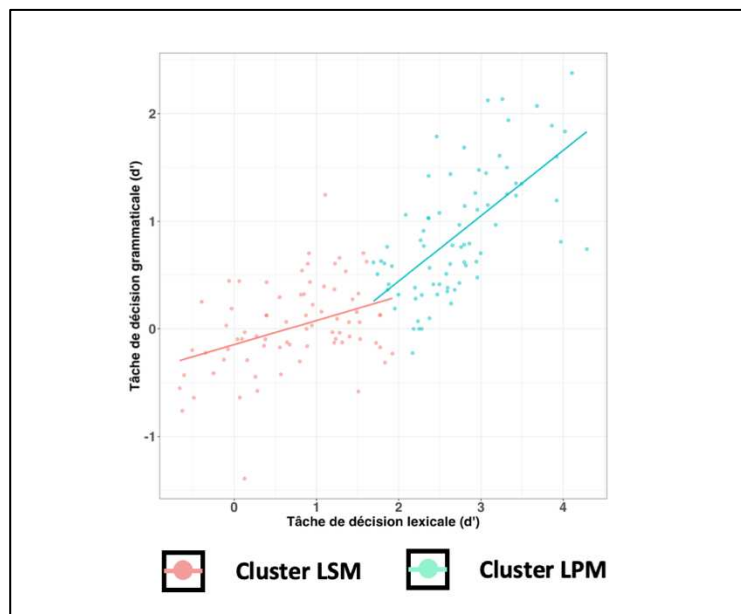


Figure 41. Représentations des relations linéaires entre les index de sensibilité moyen par participant de la tâche LD et GD en fonction du type de cluster (LSM vs. LPM)

#### 4.2.4. Discussion

L'objectif de cette étude était de décrire l'évolution de la capacité à traiter les mots en parallèle au cours de l'acquisition de la lecture et d'examiner le lien entre cette capacité et la reconnaissance des mots écrits. Pour cela, des enfants de 2<sup>ème</sup>, 4<sup>ème</sup> et 6<sup>ème</sup> année ont été soumis à une tâche de décision lexicale et une tâche de décision grammaticale. Les résultats ont montré que tous les groupes étaient capables de reconnaître les mots dans la tâche de décision lexicale, mais seuls les enfants de 4<sup>ème</sup> et de 6<sup>ème</sup> année étaient capables de distinguer les séquences grammaticales des séquences non-grammaticales dans la tâche de décision grammaticale. En outre, les deux groupes d'enfants identifiés par l'analyse de classification différaient quant à leur capacité à différencier ces séquences. Chez les enfants capables de détecter les séquences grammaticales, la sensibilité dans cette tâche était fortement corrélée à la sensibilité à la tâche de décision lexicale.

Tout d'abord, les résultats de la tâche de décision lexicale ont confirmé ceux obtenus lors de la première étude de cette thèse, montrant que tous les enfants étaient capables d'identifier les mots écrits. En effet, chez les enfants de deuxième année, la sensibilité pour une durée de présentation de 150 ms est équivalente dans les deux études (Étude 1 :  $d' = 1.03$ , Étude 4 :  $d' = 0.65$ ). Le fait que les enfants de deuxième année soient capables d'identifier les mots même pour des durées de présentation brèves (70 ms) suggère qu'ils sont déjà engagés dans un traitement parallèle de l'identité et de la position des lettres dans le mot. Ce résultat est en accord avec de nombreuses études soutenant que les apprentis lecteurs développent très rapidement des processus d'identification du mot écrit efficient (e.g., Aghababian & Nazir, 2000; Varga et al., 2020). Toutefois, la faiblesse des index de sensibilité chez les enfants de deuxième année nécessite de considérer que ces processus sont encore insuffisamment développés et requièrent plusieurs années d'apprentissage avant d'atteindre leur pleine efficacité.

D'autre part, les résultats de la tâche de décision grammaticale ont révélé que seuls les enfants de 4ème et 6ème année étaient capables de discriminer les séquences grammaticales des séquences non-grammaticales. Cela suggère que la capacité à traiter plusieurs mots simultanément se développe tardivement entre la 2ème et la 4ème année d'apprentissage, ce qui est en accord avec les observations antérieures de Massol et Grainger (2021) concernant l'effet de la supériorité de la phrase chez les enfants de troisième année. La nature tardive de cet effet peut questionner dans la mesure où les enfants de première année sont capables d'intégrer spatialement de l'information orthographique à travers plusieurs mots comme montré par (Snell et al., 2021). Une solution à cette divergence serait de considérer que la nature de l'information extraite de plusieurs mots (i.e., l'information purement orthographique) est insuffisante pour construire une représentation syntaxique de la phrase qui nécessite d'intégrer des informations de plus haut niveau (i.e., des informations syntaxiques). Cauchi et al. (2022) ont par exemple montré dans un paradigme de flanqueurs que les enfants ont des difficultés à intégrer une

information de nature morphologique. Ce n'est qu'à l'âge adulte, après plusieurs années de spécialisation, que l'intégration de ce type d'information peut être observée. Dans cette lignée, nos résultats suggèrent que la capacité à traiter plusieurs mots simultanément nécessite plusieurs années avant d'atteindre sa pleine efficacité. Dans une étude auprès d'adultes normo-lecteurs, Mirault et Grainger (2020) ont montré qu'une durée de présentation de 300 ms était suffisante pour extraire l'ensemble des informations nécessaires à la discrimination des séquences grammaticales et non-grammaticales. En revanche, dans la présente étude, les enfants de 4<sup>ème</sup> et 6<sup>ème</sup> année ne semblaient pas disposer de processus de traitement en parallèle des mots suffisamment efficaces pour extraire la totalité des informations à cette durée de présentation puisqu'ils continuaient de bénéficier de l'allongement de chacune des durées de présentation. La construction d'une représentation syntaxique de la phrase à partir de l'extraction simultanée de l'identité des mots est par conséquent une habileté qui nécessite de longues années d'apprentissage.

Ces conclusions sont soutenues par l'analyse de classification réalisée. Cette dernière a permis de révéler l'existence de deux profils d'enfants : un profil "LPM" capable de discriminer les séquences grammaticales des séquences non-grammaticales, et un profil "LSM" incapable de le faire. La distinction entre ces deux profils était principalement expliquée par le niveau de lecture des enfants : 85 % des enfants ayant un score de lecture supérieur à 268 étaient associés au profil LPM, alors que 76 % des enfants ayant un score de lecture inférieur à 268 étaient associés au profil LSM. Cette valeur seuil correspondait au niveau moyen de lecture attendu pour un enfant en 5<sup>ème</sup> année et était proche de la valeur seuil obtenue dans l'Étude 1 pour distinguer les profils de haute et basse performances orthographiques. Ces résultats corroborent l'hypothèse que le développement du traitement parallèle des mots exige un niveau avancé d'expertise orthographique.

Dans la perspective développementale développée ici, les capacités d'identification du mot écrit jouent un rôle important (Massol & Grainger, 2021). À cet égard, l'analyse de la relation entre les indices de sensibilité de la tâche de décision lexicale et ceux de la tâche de décision grammaticale fournit une exploration empirique à l'appui de cette hypothèse. Les résultats de cette analyse montrent que le coefficient de corrélation linéaire entre ces deux variables diffère significativement entre les profils LSM et LPM, la corrélation étant beaucoup plus forte pour les enfants du groupe LPM. Ce résultat suggère que tant que les capacités d'identification du mot écrit sont insuffisamment développées, comme c'est le cas chez les enfants du profil LSM, celles-ci ne permettent pas de stimuler les capacités de traitement simultané des mots. En revanche, dès qu'elles ont atteint un niveau critique<sup>24</sup>, comme c'est le cas chez les enfants du profil LPM, les capacités d'identification du mot écrit permettent de prédire les performances sur le traitement simultané des mots. Ces conclusions rejoignent celles de Brossette et al. (2022) chez l'adulte normo-lecteur, démontrant que l'identification des mots écrits est une étape de traitement essentielle qui conditionne la qualité des jugements grammaticaux.

#### ***4.2.5. Conclusion***

L'objectif de la présente étude était de caractériser la trajectoire développementale du traitement en parallèle des mots pendant l'apprentissage de la lecture et de mesurer sa relation avec la reconnaissance de mots écrits. Nos résultats indiquent que cette compétence émerge tardivement, entre la deuxième et la quatrième année d'apprentissage. Nous considérons que cette émergence tardive peut s'expliquer par la nécessité préalable de développer des compétences orthographiques solides, en particulier en matière d'identification des mots écrits, atteignant un niveau proche de la moyenne attendue en cinquième année d'apprentissage.

---

<sup>24</sup> Le niveau critique identifié dans la présente étude est un score CTL au test de l'Alouette égal à 268 qui correspond au niveau moyen attendu lors de la 5<sup>ème</sup> année d'apprentissage.

## CHAPITRE 5. AUTRES CONTRIBUTIONS

### 5.1. Étude 5. Étude de l'invariance miroir lors de l'encodage de l'identité abstraite des lettres.

#### 5.1.1. Objectifs

Dans cette cinquième étude, nous avons examiné le traitement orthographique des lettres miroirs non-réversibles. L'analyse du traitement de ces lettres revêt une importance particulière pour comprendre la réorganisation corticale qui se produit lors de l'apprentissage de la lecture. En effet, la région corticale dédiée au traitement orthographique, appelée aire visuelle de la forme des mots, est initialement dédiée à la reconnaissance des objets et des images. Cependant, sous l'influence de l'exposition à l'écrit, cette zone corticale se spécialise dans le traitement des lettres (L. Cohen et al., 2000). Les propriétés d'invariance nécessaires à la reconnaissance des objets et des visages sont alors réutilisées pour la reconnaissance des lettres. Par exemple, comme une bouteille reste une bouteille quelle que soit sa taille, l'identité d'une lettre reste la même, qu'elle soit écrite en grand ou en petit. Cependant, certaines propriétés d'invariance peuvent poser problème, en particulier la propriété d'invariance miroir car elle peut causer des confusions pour la reconnaissance de lettres symétriques telles que le b et le d, ou le p et le q.

Afin d'éviter les confusions causées par la propriété d'invariance miroir lors de l'apprentissage de la lecture, cette propriété serait désapprise progressivement. Des données en neuro-imagerie soutiennent cette proposition en montrant que la présentation de mots miroirs n'active pas l'aire visuelle de la forme des mots (Dehaene et al., 2010; Pegado et al., 2011). Cependant, certains auteurs remettent en question la possibilité de renverser rapidement une propriété héritée de l'évolution. Pour explorer cette question, Duñabeitia et al. (2011) soulignent que ces traitements d'invariance, ancrés dans l'évolution, sont automatiques et nécessitent, pour être révélés, des techniques d'investigation avec une résolution temporelle fine. En utilisant des

enregistrements électrophysiologiques, ces auteurs ont montré que les lettres miroirs et leurs versions canoniques étaient traitées comme une même unité lors des premières étapes d'encodage orthographique. Ce n'est qu'au cours des étapes de traitement ultérieures qu'elles étaient traitées comme des versions distinctes. Ce résultat suggère que la propriété d'invariance miroir n'est pas entièrement désapprise et continue d'exercer une influence sur les premières étapes de la reconnaissance des lettres.

Dans cette étude, notre objectif était de trouver des preuves comportementales confirmant les résultats obtenus en électrophysiologie par Duñabeitia et al. (2011). Nous avons noté que l'absence de preuves comportementales en faveur de la persistance de la propriété d'invariance miroir des lettres lors de la reconnaissance de mots écrits pouvait être due au manque de sensibilité des paradigmes expérimentaux utilisés. Afin d'étudier cela, nous avons comparé deux paradigmes d'amorçage masqué : le paradigme classique et le paradigme dit en "sandwich" (Lupker & Davis, 2009) susceptible d'être plus sensible au traitement orthographique. Nous avons émis l'hypothèse qu'une augmentation de la sensibilité aux processus de nature orthographique pourrait faire émerger un effet facilitateur des amorces miroir par rapport aux amorces non-relées. De plus, pour nous assurer que les effets d'amorçage des lettres en miroir étaient bien d'origine orthographique, nous avons manipulé la fréquence lexicale des mots. Nous avons utilisé la méthode des facteurs additifs de Sternberg (1969, 2011) et avons supposé que les effets d'amorçage des lettres en miroir et de fréquence lexicale devraient être additifs, car ils devraient agir à des étapes de traitement différentes.

## **Searching beyond the looking glass with sandwich priming.**

Brice Brossette<sup>1\*</sup>, Stéphanie Massol<sup>1</sup>, & Bernard Lété<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université Lyon 2, Laboratoire d'Étude des Mécanismes Cognitifs (EA 3082), Bron, France

Attention, Perception & Psychophysics, 2022, Volume 84, Pages : 1178-1192

\* Corresponding author: Brice Brossette, Laboratoire d'Étude des Mécanismes Cognitifs (EA 3082), 5 Avenue Pierre Mendès France, 69500 Bron, France. Email : [brice.brossette@univ-lyon2.fr](mailto:brice.brossette@univ-lyon2.fr)

Copyright : The Author(s) 2022

<https://doi.org/10.3758/s13414-021-02405-y>

Soumis le 26 avril 2021 ; Accepté le 30 octobre 2021



### ***5.1.2. Abstract***

Duñabeitia et al. (2011) demonstrated that mirror letters induce the same electrophysiological response as canonical letters during the orthographic stage of visual word recognition. However, behavioral evidence in support of such an effect has remained scarce. We hypothesize that the poor reliability of the behavioral data could be due to the lack of sensitivity of the paradigms used in the literature. In Experiment 1 and Experiment 2, we compared conventional and sandwich masked priming paradigms. Results showed that mirror primes (**mirrot**) produced a significant priming effect on high-frequency words in the case of sandwich priming only. In Experiment 3, we used sandwich priming with a new material set to address a number of concerns regarding prime-target visual overlap. We obtained a graded facilitatory mirror-letter priming effect which acted additively with lexical frequency, thus supporting the idea that it originates in the fast automatic orthographic stage. Given that the graded priming effect provides little support for the idea of the complete preservation of mirror invariance for non-reversal letters, complementary explanations are explored.

### ***5.1.3. Introduction***

What is the letter “a”? How can we categorize 'a' as identical to 'A' but different from 'b'? How does the visual system compute abstract letter identities? These are central questions for the comprehension of the orthographic processing underlying visual word recognition. Abstract letter representations are assumed to be feature-based (Dehaene et al., 2005; Grainger et al., 2008), as well as size-insensitive, case-insensitive, typography-insensitive, and sufficiently flexible to ensure letter identification even when these are highly distorted, as in the case of captcha (Chauncey et al., 2008; Gil-López et al., 2011; Hannagan et al., 2012). The neural implementation of this abstraction process is supported by the rapid specialization of a subpart of the left fusiform gyrus during the early stages of literacy acquisition (Dehaene-Lambertz et al., 2018): the well-known Visual Word Form Area (VWFA hereafter) (Baker et al., 2007; L. Cohen et al., 2000). The VWFA benefits from inherited properties of the visual object recognition system to solve invariance issues like size-invariance or case-invariance (for a review, see Dehaene & Cohen, 2011). However, one of these inherited properties, namely mirror invariance, should be detrimental for the efficient coding of abstract letter identities. Mirror invariance allows the visual system to recognize objects independently of their left-right profile (Dehaene et al., 2015). Therefore, mirror invariance should make it impossible to have two distinct representations for mirror letters such as ‘b’ and ‘d’. To overcome this problem, the neural recycling hypothesis proposed that a cortical remapping operates within the VWFA-site in order to develop sensitivity to mirror contrasts (Dehaene et al., 2005; Dehaene & Cohen, 2007). In two fMRI experiments using an unmasked priming paradigm, Dehaene et al. (2010) and Pegado et al. (2011) reported a repetition suppression effect in the form of a decreased activation in the VWFA only for mirror-picture primes but not for mirror-word primes or mirror-letter primes. In both studies, the authors concluded that neurons in the VWFA-site are tuned during literacy acquisition to be sensitive to mirror contrasts of letters and words.

Since both letter-identity and letter-position coding are fast and automatic processes, to explore the behavioral correlates of the mirror-letter effect it is necessary to ensure that participants are unable to manipulate mirror information consciously<sup>25</sup>. Masked priming, a method extensively used to investigate early orthographic processing (Forster & Davis, 1984; Perea & Lupker, 2004; Segui & Grainger, 1990), could meet this requirement. This paradigm consists in briefly presenting a prime immediately prior to a target stimulus. Participants are usually asked to perform a lexical decision task on the target stimulus. Although participants are not able to report the identity of the prime, it still influences target processing. This influence is measured in terms of the size of the priming effect, considered as an index of orthographic similarity between prime and target.

In line with neuroimaging findings, Perea et al. (2011) and Soares et al. (2019) found that the processing of targets which contained reversal letters (such as b, d, p, q, whose mirror letters on the vertical axis correspond to other letters in the alphabet) was harder when they were preceded by a masked prime in which a critical letter was replaced by its mirror counterpart (*i*bea-IDEA) than when preceded by a masked prime in which the critical letter was replaced by a control one (*i*lea-IDEA). The authors interpreted these results as a consequence of mirror invariance unlearning, which makes it possible to code two distinct competitive orthographic units for a reversal letter: when the letter ‘b’ is activated, the letter ‘d’ is inhibited and vice versa. Furthermore, Soares et al. (2019) revealed that this mirror-letter interference effect is reliable for words containing left-oriented mirror-letters, such as ‘d’, but not for words

---

<sup>25</sup> Numerous studies have observed an increased sensitivity to mirror contrasts during the conscious and deliberate manipulation of mirror information. Since the original observations by Cornell (1985) among children from 3- to 14- years old, this phenomenon has been found to be highly reproducible across a large variety of tasks (negative priming: Borst et al. (2015); visual search: Fernandes et al. (2018); same-different matching: Fernandes et al., (2016). Despite different operationalizations, this increased sensitivity appears to be: (1) a function of literacy experience (Ahr et al., 2016; Fernandes et al., 2016); (2) not restricted to the visual modality (de Heering et al., 2018; de Heering & Kolinsky, 2019); (3) extended to non-linguistic objects such as geometrical shapes (Kolinsky & Fernandes, 2014); and (4) absent in illiterate subjects (Fernandes et al., 2018; Pegado et al., 2014) or in readers of curvilinear scripts, which do not contain mirror letters such as Tamil (Danziger & Pederson, 1998; Pederson, 2003). Given that these tasks involved cognitive processes beyond the scope of the current paper (i.e., fast automatic orthographic processing), we will not discuss these results in the present study.

containing right-oriented mirror-letters, such as ‘b’; and Soares et al. (2021) observed that this right-oriented bias was also present for words containing non-reversal letters.

Perea et al. (2011) showed that the mirror-letter effect operates differently for non-reversal letters, defined as letters which do not have any valid letter representation for their mirror counterpart (e.g., a, e, r, ...). In Experiment 2, they found that mirror primes with a non-reversal letter produced a similar facilitatory effect to identity primes (arena-ARENA vs. alena-ARENA). Note, however, that a mirror-letter facilitatory effect for non-reversal letters, which would suggest mirror invariance preservation for such letters, was not definitively demonstrated given the null effect between control primes and mirror primes (i.e., prime effect for alena-ARENA was equivalent for azena-ARENA).

The existence of a mirror-letter facilitatory effect for non-reversal letters was first demonstrated by Duñabeitia et al. (2011) in an EEG study using masked priming (with primes and targets in lowercase) in a go/no go semantic categorization task. In Experiment 1, with four out of nine internal non-reversal mirror-letters, they showed that identity primes and mirror primes induced the same electrophysiological response on the N250 component, which is known to be an index of orthographic similarity (Grainger & Holcomb, 2009). In Experiment 2, to attenuate visually overlapping features of the two strings, a mirror rotation of the whole target word on the vertical axis was used (leading also to invert letter-positions). The same pattern of results as in Experiment 1 was found.

Using a same-different masked priming paradigm, Winkler and Perea (2018) studied the mirror invariance effect in Roman script with mirror letters and Thai script without mirror letters. Mirror primes were constructed by the mirror rotation on the vertical axis of the two internal non-reversal letters in four-letter words. For English readers, there was a facilitatory effect of the mirror prime in comparison to the control-mirror prime (-23 ms) but the mirror prime was not as facilitatory as the identity prime (-39 ms). For Thai readers, there was a similar

facilitatory effect of both the mirror prime (-18 ms) and the identity prime (-22 ms) in comparison to the control-mirror prime. Consequently, and without needing to unlearn mirror letters, the Thais were more likely to perceive mirror letters as similar to identical letters than the English readers.

In sum, there is evidence for a mirror-letter inhibitory effect for reversal letters in orthographic processing, and for a mirror-letter facilitatory effect for non-reversal letters, suggesting that, contrary to Dehaene et al. (2005, 2010), mirror invariance is not fully inhibited or unlearned during word recognition. Considering the mirror-letter facilitatory effect, which is at the core of the present paper, note that Duñabeitia et al. (2011) found an equal priming effect for identity primes and mirror primes on N250, in the same way as in Perea et al.'s (2011) Experiment 2; whereas Winkler and Perea (2018) found a graded effect. No behavioral data were reported by Duñabeitia et al. (2011).

Thus, further investigations are required to demonstrate that the mirror-letter facilitatory effect for non-reversal letters originates in the fast automatic orthographic stage, and that mirror invariance preservation, if it exists, is achieved at the level of abstract letter representations. To focus on letter processing only, we limit our study to mirror letters, leaving aside whole word rotation as reported in Experiment 2 of Duñabeitia et al. (2011).

In Experiment 1, we attempt to demonstrate a mirror-letter facilitatory effect for non-reversal letters using the classical masked priming paradigm in a lexical decision task in order to better study the prelexical processes involved in visual word recognition, which operates at the level of abstract letter identities. Three priming conditions with non-reversal letters were used: (1) prime which was identical to target (cause-CAUSE), (2) mirror prime based on mirror rotation of each letter on the vertical axis (ϯϯϯϯ-CAUSE), (3) control prime composed of digits (12345-CAUSE). To investigate letter-identity coding specifically, we chose a letter-by-letter rotation rather than a whole-word rotation, thus avoiding confounds with letter-order

coding. Moreover, we decided to rotate all the letters contained in the word rather than only internal letters, unlike in Duñabeitia et al. (2011, exp. 2) and Perea et al., (2011). This manipulation therefore allowed us to counteract possible confounds arising from the differential visibility of the letters resulting from their position in the string (Marzouki & Grainger, 2014; Scaltritti & Balota, 2013). Hence, if mirror invariance operates for non-reversal letters at the level of orthographic processing, letter identification should be preserved. Consequently, shorter reaction times should be obtained in the mirror condition than the control condition. Lexical frequency (i.e., high- vs. low-frequency words) was also manipulated to provide information about the temporality of this effect, assuming that orthographic processing and lexical access are partially ordered. According to the additive factors method (Sternberg, 1969, 2011), if two factors act at different stages of processing then no interaction should be observed between these factors. If the opposite is true then these factors interact. Thus, if mirror invariance occurs during orthographic prelexical processing, then the Priming factor should not interact with the Lexical Frequency factor, which is known to occur at later processing stage (for a detailed review of the word frequency effect in visual word recognition, see Balota, 1994; Balota et al., 2006).

#### ***5.1.4. Experiment 1: Classical masked priming paradigm***

##### **5.1.4.1. Method**

###### ***5.1.4.1.1. Participants***

Fifty-four students (40 females, 14 males) from Lyon University, ranging in age between 18 and 33 years (mean age = 21.6 years old; SD = 2.8), gave informed consent to participate in this study. Participants were tested individually in a quiet room and reported being non-dyslexic, French native speakers, and having normal or corrected-to-normal vision.

#### 5.1.4.1.2. *Design and Stimuli*

There were three priming conditions: (1) identical primes (identity condition, in which the identity of the letters was identical to that of the target (word: **cause-CAUSE**; pseudoword: **chure-CHURE**), (2) mirror primes constructed using the letter-by-letter mirror rotation of the identical prime (word: **ɹɹuɹɹ-CAUSE**; pseudoword: **ɹɹɹɹ-CHURE**), (3) control primes involving an ordered sequence of numbers of the length of the target word (word: **12345-CAUSE**; pseudoword: **12345-CHURE**)<sup>26</sup>.

One hundred and eight words were selected from the Manulex database (Lété et al., 2004). The word length was between 4 and 6 letters (mean = 5.00; SD = 0.82). None of these words contained mirror letters (b, d, p, q) or diacritics. The number of symmetrical lowercase letters (i.e., i, j, l, m, n, o, u, v, w, x, y) was minimized (mean symmetrical letters per word = 1.09; SD = 0.29). The set included infinitive verbs, adjectives, participles, pronouns, adverbs and auxiliaries. Half of these words were of low frequency (mean word frequency per million = 1.88, mean Zipf value = 2.76; according to van Heuven et al., 2014) and the other half were of high frequency (mean word frequency per million = 94.30, mean Zipf value = 4.73). For the purposes of the lexical decision task, a set of 108 pseudo-words was constructed based on existing words from the lexicon in which one to three letters were replaced.

#### 5.1.4.1.3. *Procedure*

The experimental procedure was implemented with DMDX (Forster & Forster, 2003). Stimuli were presented on a Fujitsu Siemens 9400 monitor calibrated to 14-inch (1280x800 px). Stimuli were presented as white letters centered vertically and horizontally on a black

---

<sup>26</sup> As mentioned by an anonymous reviewer, the priming effect can be biased by a congruency effect (slower response times for "yes" responses when the prime is a non-word) when the identity condition (**cause-CAUSE**) and the mirror condition (**ɹɹuɹɹ-CAUSE**) are compared to the control condition, in which a non-lexical prime is used (Experiments 1 and 2: **12345-CAUSE**; Experiment 3: **ɹɹɹɹ-CAUSE**). However, as shown by Fernández-López et al. (2019), no congruency effect is observed in lexical decision when the foils are orthographically legal. Therefore, the lexicality of the prime was not expected to affect the effects here.

background. Each trial started with a 500 ms centralized forward mask. The prime was then presented in lowercase (size: 12pt, font: Arial except for mirror primes, which were displayed in PRMirror) for a duration of 48 ms. The prime was immediately followed by the target, which was displayed until the participant’s response or for a maximum of 3000 ms. All targets were displayed in uppercase, Arial font 12pt (see Figure 42 for a typical trial).

Participants were seated at a distance of 60 cm from the screen. Their task was to decide whether or not the target was a French word by pressing the “Right Shift” key when the target was a word or the “Left Shift” key otherwise (or the "Left Shift" and "Right Shift" keys, respectively, if the participant was left-handed).

Using a Latin-square design, all items (i.e., both words and pseudowords) were presented in all priming conditions, but only once per participant. Three lists were constructed to ensure a counterbalanced presentation. The set of 216 items was divided into 9 blocks of 24 trials each. Items within blocks and blocks within lists were presented in a randomized order for each participant. To avoid fatigue, a break was offered between each block. The total duration of the task was about 15 minutes.

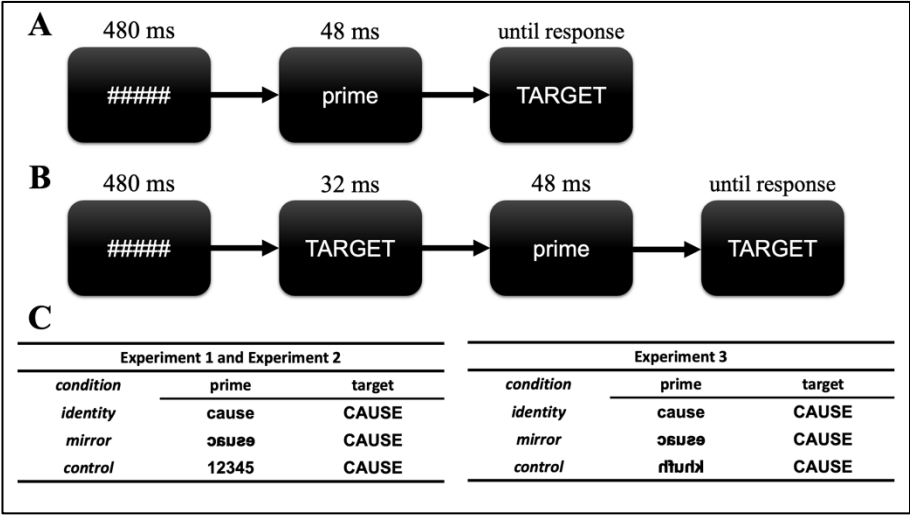


Figure 42. Schematic representation of the classic masked priming paradigm used in Experiment 1-a. (B) Schematic representation of the sandwich masked priming paradigm used in Experiment 1-b and Experiment 2. (C) Example of items used in Experiment 1 and Experiment 2.



#### 5.1.4.2. Results

The dataset retained for analysis consisted of 972 observations per condition. RTs and accuracy data were analyzed using linear mixed effects and generalized linear mixed effects (*lme4* package in R; Bates et al., 2015). For RTs, the  $-1,000/\text{RT}$  transformation was used. The LME analyses were conducted using Frequency (high frequency vs. low frequency) and Type of prime (mirror vs. control vs. identity) as fixed factors. For each model, the maximal random structure model that successfully converged was used. We tested overall effects using Type III sum of squares and  $\chi^2$  Wald tests. Post-hoc contrasts were calculated using the *emmeans* package (Lenth, 2023). Full model outputs are given in Supplemental Material.

In addition, we calculated a Bayes Factor for each critical priming contrast in order to avoid the traditional problem of frequentist null-hypothesis significance testing (NHST), as a result of which no reliable conclusions can be drawn for non-significant results: a null-effect can provide evidence against a theory or just reflect the insensitivity of the data (e.g., low power, high standard errors). The Bayes factor analysis provides an easy, accessible, and sensitive option to quantify how likely the data is under one hypothesis compared to another (Dienes, 2014, 2016; Rouder et al., 2009). For the purposes of the present study, we wanted to determine whether the presence of a significant priming contrast (H1) is more likely than its absence (H0). The resulting ratio ( $\text{BF}_{10}$ ) can vary between 0 and infinity, with values closer to zero being in favor of H0 (usually below 1/3), values around 1 being non-conclusive (similar support for both H1 and H0), and larger values (usually above 3) favoring H1 (for a detailed classification, see Lee & Wagenmakers, 2014). Bayes Factor (BF) analyses were conducted by fitting a model with the *rstanarm* R package (Goodrich B et al., 2020) while using the same model structure as that used in NHST analysis. The BF for each critical contrast was then calculated using the *bayestestR* R package (Makowski et al., 2019). Mean RTs per condition and  $\text{BF}_{10}$  for each critical contrast are presented in Tableau 9.

Tableau 9. Mean response times (in ms) and standard errors (in parentheses) for each experimental condition in Experiment 1.

| Prime condition                   | Target Frequency  |   |
|-----------------------------------|---|---|
|                                   | High frequency  | Low frequency   |
| identity                          | 595 (10)  | 700 (15)  |
| mirror                            | 627 (12)  | 723 (14)  |
| control                           | 623 (9)   | 741 (15)  |
| <i>identity - mirror contrast</i> | <b>-32*</b><br><b>BF<sub>10</sub> &gt; 100; evidence for H1</b> | <b>-23*</b><br><b>BF<sub>10</sub> = .76; non-conclusive</b> |
| <i>mirror - control contrast</i>  | +3<br><b>BF<sub>10</sub> &lt; .01; evidence for H0</b>          | -18<br><b>BF<sub>10</sub> &lt; .01; evidence for H0</b>     |

Note : \*  $p < .001$  for post-hoc analysis conducted on priming contrasts with the emmeans R package.

#### 5.1.4.2.1. RTs

Only the data for words were analyzed. Four items with overall accuracy below 50% were excluded. Incorrect responses (7.26%) and correct responses with RTs less than 300 ms (0.08%) were first excluded from the analyses. Then, trials with outliers, defined as RTs more than 2.5 SD above or below the participant's mean, were excluded (2.94% of the correct answers).

The analysis of RTs showed a significant main effect of Frequency ( $\chi^2 = 126.53$ ,  $t = 11.25$ ,  $p < .001$ ): RTs were shorter for high-frequency than for low-frequency words ( $\Delta RT = 106$  ms). There was also a main effect of Type of prime ( $\chi^2 = 50.69$ ,  $p < .001$ ): RTs for identity primes were significantly faster than for mirror primes ( $\Delta RT = 27$  ms,  $z = 6.26$ ,  $p < .001$ ) or for control primes ( $\Delta RT = 34$  ms,  $z = 6.47$ ,  $p < .001$ ) and there was no significant difference between RTs for mirror and control primes ( $\Delta RT = 7$  ms,  $z = 1.21$ ,  $p = .45$ ). These results were confirmed by Bayesian analysis (see Tableau 9). In addition, the interaction between Frequency and Type of Prime was non-significant ( $\chi^2 = 1.56$ ,  $p = 0.46$ ).

#### 5.1.4.2.2. Accuracy

The analyses of the accuracy data showed a significant main effect of Frequency ( $\chi^2 = 46.50, z = 6.82, p < .001$ ) with higher error rates for low-frequency words than for high-frequency words ( $\Delta ER = 10.50\%$ ). There was a non-significant main effect of Type of Prime ( $\chi^2 = 1.41, p = .49$ ). In addition, the interaction between Frequency and Type of Prime was non-significant ( $\chi^2 = 1.32, p = .52$ ).

#### 5.1.4.3. Discussion

In Experiment 1, we conducted a classical masked priming lexical decision task. Results revealed that identity primes produced shorter RTs compared to control and mirror primes, which did not differ. Thus, the use of the classical masked priming paradigm in the present study failed to reveal a significant mirror priming effect for non-reversal letters. These results conflict with previous results indicating such an effect with mirror rotation of internal letters (Winskyel & Perea, 2018) or with full word and mirror rotation of letters (Duñabeitia et al., 2011).

One way to reconcile these results is to examine the nature of the tasks that were used. In our experiment, we used the well-known lexical decision task combined with the classical version of the masked priming paradigm. In recent decades, this combination has proven to be very useful for revealing a wide range of orthographic effects (for a review, see Grainger, 2008). Nevertheless, as pointed out by Kinoshita and Norris (2012), this task primarily reflects lexical priming. According to this view, small orthographic effects produced by mirror-letter primes (Davis & Lupker, 2017) or superset primes (Lupker et al., 2020) could be drowned out by lexical competition occurring during the decision stage. This could explain why no mirror priming effect was observed in Experiment 1.

In addition, lexical access is not required in order to perform the comparison between the reference and the target in the same-different matching task. Hence, Kinoshita and Norris

(2012) argue that this task is insensitive to lexical competition and is more likely to reveal a clearer measure of orthographic effect. This could explain why Winskel & Perea (2018) succeeded in revealing a mirror priming effect for non-reversal letters.

If these assumptions are correct, an alternative paradigm aimed at reducing the lexical competition in the lexical decision task could allow a mirror priming effect for non-reversal letters to emerge. This is possible thanks to the sandwich priming paradigm proposed by (Lupker & Davis, 2009). Moreover, Fernández-López et al. (2022) recently showed that even if the faster responses were obtained in the identity condition (due to the reduction of lexical competition), the unrelated condition is also affected in the inverse direction producing slower responses. This two-fold effect could explain why sandwich priming is able to capture subtle orthographic priming manipulations.

#### ***5.1.5. Experiment 2: Sandwich priming***

As noted above, the classical version of the masked priming paradigm combined with a lexical decision task has limited sensitivity, especially when primes and targets are moderately similar. For example, Grainger (2008) highlighted that priming effects obtained by contrasting double substitution primes (e.g., galpen-GARDEN) with completely unrelated primes (e.g., tolpan-GARDEN) are generally not robust. This could be explained by the fact that during the course of visual word recognition, the prime does not activate only the target unit but also neighboring orthographic units which compete via lateral inhibitory connections (see McClelland and Rumelhart, 1981, for a model; and Davis and Lupker, 2006; Massol et al., 2010; Segui and Grainger, 1990 for empirical evidence). Thus, the observed priming effects consist of a combination of bottom-up support for the target unit (i.e., facilitation) and influences from activated neighboring orthographic units (i.e., inhibition). The advantage of the sandwich masked priming method proposed by Lupker and Davis (2009) is that it reduces the weight of the inhibition process by reinforcing that of the facilitation process (i.e. the weight of

target unit activation). Lupker and Davis (2009) proposed incorporating an additional 33-ms presentation of the target immediately prior to the prime, which is now sandwiched between the two presentations of the target. Hence, the first presentation of the target provides an initial boost to the activation of the target unit which makes it possible to counteract the inhibition process arising from activated neighboring orthographic units. This methodological procedure has been proved to be useful for revealing small orthographic priming effects, both at the behavioral (Davis & Lupker, 2017; Lupker et al., 2020; Ziegler et al., 2014) and electrophysiological levels (Ktori et al., 2012). Therefore, in Experiment 2, we replicated Experiment 1 using the sandwich masked priming method in order to better detect a mirror priming effect for non-reversal letters.

#### **5.1.5.1. Method**

##### ***5.1.5.1.1. Participants***

Fifty-four students (32 females, 22 males) from Lyon University, ranging in age between 18 and 33 years (mean age = 22.6 years old; SD = 3.0), gave informed consent to participate in this study. Participants were tested individually in a quiet room and reported being non-dyslexic, French native speakers, and having normal or corrected-to-normal vision.

##### ***5.1.5.1.2. Design and Stimuli***

The primes, targets, experimental design, and computer equipment were the same as in Experiment 1.

##### ***5.1.5.1.3. Procedure***

There was only one procedural difference between Experiments 1 and 2. In the latter, the target word itself was presented in uppercase for 33 ms in each trial immediately following

the forward mask and immediately prior to the prime according to Lupker and Davis's procedure (Lupker & Davis, 2009).

### 5.1.5.2. Results

The dataset retained for analysis consisted of 972 observations per condition. RTs data, accuracy data and  $BF_{10}$  were fitted using the same procedure as described in Experiment 1a. Mean RTs per condition are presented in Tableau 10.

#### 5.1.5.2.1. RTs

Only the data for words were analyzed. Six items with overall accuracy below 50% were excluded. Incorrect responses (8.39%) and correct responses with RTs less than 300 ms (0 observation) were first excluded from the analyses. Then, trials with outliers, defined as RTs more than 2.5 SD above or below the participant's mean, were deleted (2.85% of the correct answers).

The analysis of RTs showed a significant main effect of Frequency ( $\chi^2 = 82.25, t = 9.07, p < .001$ ): RTs were shorter for high-frequency words than for low-frequency words ( $\Delta RT = 80$  ms). There was also a main effect of Type of Prime ( $\chi^2 = 129.06, p < .001$ ): RTs for identity primes were significantly faster than for mirror primes ( $\Delta RT = 25$  ms,  $z = 6.07, p < .001$ ) or for control primes ( $\Delta RT = 42$  ms,  $z = 11.21, p < .001$ ) and, contrary to Experiment 1, there was a significant difference between RTs for mirror and control primes ( $\Delta RT = 17$  ms,  $z = 4.08, p < .001$ ). These results were confirmed by Bayesian analysis (see Tableau 10). Moreover, the interaction between Frequency and Type of Prime was significant ( $\chi^2 = 8.83, p < .05$ ): the difference between mirror and control primes was only significant for high-frequency words ( $\Delta RT = 26$  ms,  $z = 5.24, p < .001$ ) but not for low-frequency words ( $\Delta RT = 8$  ms,  $z = .88, p = .66$ ).

Tableau 10. Mean response times (in ms) and standard errors (in parentheses) for each experimental condition in Experiment 2.

| Prime condition            | Target Frequency                                     |  |
|----------------------------|--|--|
|                            | High frequency                                       | Low frequency  |
| identity                   | 553 (9)  | 628 (13)   |
| mirror                     | 570 (9)  | 662 (14)   |
| control                    | 596 (10)   | 670 (15)   |
| identity - mirror contrast | -17*<br><b>BF<sub>10</sub> = .71; non-conclusive</b> | -34*<br><b>BF<sub>10</sub> = 11; evidence for H1</b>   |
| mirror - control contrast  | -26*<br><b>BF<sub>10</sub> = 59; evidence for H1</b> | -8<br><b>BF<sub>10</sub> &lt; .01; evidence for H0</b> |

Note : \* $p < .001$  for post-hoc analysis conducted on priming contrasts with the emmeans R package.

#### 5.1.5.2.2. Accuracy

The analyses of the accuracy data showed a significant main effect of Frequency ( $\chi^2 = 44.23$ ,  $z = 6.65$ ,  $p < .001$ ), with higher error rates for low-frequency than for high-frequency words ( $\Delta ER = 12.10\%$ ). There was a significant main effect of Type of Prime ( $\chi^2 = 7.24$ ,  $p < .05$ ): identity primes elicited lower error rates than mirror primes ( $\Delta ER = 2.30\%$ ,  $z = 2.69$ ,  $p < .05$ ) and no other contrasts reached significance (all  $p > .05$ ). In addition, the interaction between Frequency and Type of Prime was non-significant ( $\chi^2 < 1$ ).

#### 5.1.5.3. Discussion

The aim of Experiment 2 was to extend Experiment 1 by using the sandwich masked priming paradigm. The prior presentation of the target is thought to provide an initial boost to the activation of the target unit, thus counteracting the inhibition process arising from activated neighboring orthographic units. Without any modification of the experimental stimuli, results showed that the sandwich masked priming paradigm produced a graded mirror priming effect for non-reversal letters which, however, was limited to high-frequency words.

We hypothesized that if mirror invariance occurs during orthographic prelexical processing, then priming should not interact with lexical frequency, which is known to occur at

a later processing stage. The fact that the mirror priming effect was restricted to high-frequency words could be due to the more informative nature of their primes carrying by the symmetrical letters compared to those of low-frequency words. Indeed, the non-reversal letter type is not a uniform category. Non-reversal letters can be symmetrical (such as i, l, m, etc.) or not (such as a, e, s, etc.). Symmetrical letters are characterized by the fact that they have identical mirror and canonical images. In our material, the number of symmetrical letters was minimized and did not differ between high- and low-frequency words. However, the orthographic processing system might extract enough information from the symmetrical letters, thus producing the observed mirror priming effect only for the high-frequency words because these need less activation than low-frequency words. Another reason why this mirror priming effect was restricted to high-frequency words could be associated with the higher error rates for low-frequency words (20.8%) than for high-frequency words (2.7%) which led to the removal of a certain amount of data. Taken together with the extra time required to retrieve low-frequency words, this may have led to the disappearance of the priming effect on RTs.

Furthermore, one can argue that the use of digits in the control condition might be debatable even though they provide absolutely no orthographic information about the letters in the target. Indeed, the way digits and letters are processed by the orthographic processing system seems to differ. For example, Duñabeitia et al., 2012 and Massol et al., 2013) found that the transposed-character effect was more robust for letters than for digits. At the neuronal level, Hannagan et al. (2015) showed that the encoding of letters and digits could be underpinned by close but distinct neural regions. Thus, control primes consisting of mirror letters might be a more suitable way of adequately comparing the same mechanisms engaged in target processing for each priming condition.



In Experiment 3, we retained the sandwich masked priming procedure since the results of Experiment 2 showed its relevance for revealing a mirror priming effect for non-reversal letters. However, we used a new set of material with control primes consisting of letter strings.

### **5.1.6. Experiment 3**

#### **5.1.6.1. Method**

##### **5.1.6.1.1. Participants**

Sixty students (36 females, 24 males) from Lyon University, ranging in age between 18 and 30 years (mean age = 21.1 years old; SD = 2.2), gave informed consent to participate in this study. Participants were tested individually in a quiet room and reported being non-dyslexic, French native speakers, and having normal or corrected-to-normal vision.

##### **5.1.6.2. Design and Stimuli**

There were three priming conditions. Identical primes and Mirror primes were based on the design used in the preceding experiment. To rule out the previously indicated limitations of the control condition in Experiments 1 and 2, digit string primes were replaced by letter string primes. Control primes were constructed based on their associated target word by replacing non-symmetrical letters by different-consonant letters. An additional constraint was that two adjacent replaced consonants could not have the same identity. Finally, to avoid an artificial mirror priming effect, the putative informativeness of symmetrical letters was maintained across priming conditions by keeping the symmetrical letters at the same position in the control primes (e.g., control: **gauche**, mirror: **psuorle**, identity: **gauche** for target **GAUCHE**). In sum, with these constraints imposed for the control primes, any mirror-priming effect could only be due to the orthographic information conveyed by the mirror letters.

To increase the statistical power of Experiment 3 compared to Experiments 1 and 2, 306 words (instead of 108) were selected from the Manulex database (Lété et al., 2004). The set

included verbs, adjectives, participles, pronouns, adverbs and auxiliaries. One hundred and fifty-three were low-frequency words (mean word frequency per million = 117.44, mean ZipF value = 4.87) and 153 were high-frequency words (mean word frequency per million = 3.20, mean ZipF value = 3.38). Word length was between 5 and 7 letters. None of these words contained mirror letters (b, d, p, q) or diacritics. The number of symmetrical lowercase letters (i.e., i, j, l, m, n, o, u, v, w, x, y) was minimized so that the words contained a maximum of two symmetrical letters (mean symmetrical letters per word = 1.42; SD = 0.63). To reduce the error rate observed in Experiments 1 and 2, we ensured that the selected words did not induce too many errors, based on the data provided by the French Lexicon Project (Ferrand et al., 2010). The results showed that the selected words had error rates of less than 20%<sup>27</sup>. Based on the *French Lexicon Project*, we selected a set of 306 pseudowords with error rates lower than 10% and a matched orthographic similarity with words (mean word OLD20 = 1.86, SD = 0.36 and mean pseudo-word OLD20 = 1.83, SD = 0.24) obtained using the *vwr* R package (Keuleers, 2013) based on the old20 measure reported by Yarkoni et al. (2008). Pseudowords were also matched with words in terms of the absence of reversible letters, the minimization of symmetrical letters and their length. The lexical characteristics of the material are listed in Tableau 11.

#### **5.1.6.2.1. Procedure**

Computer equipment and experimental procedure were the same as in Experiment 2. A Latin-square design with three lists was used to ensure that all items (i.e., both words and pseudowords) were presented in the three priming conditions, but only once per participant. The set of 612 items were divided into 17 blocks of 36 trials. Items within blocks and blocks

---

<sup>27</sup> Except for seven selected words which were not included in the French Lexicon Project.

within list were presented in a randomized order for each participant. The total duration of the task was about 25 minutes.

Tableau 11. Means and SDs (in parentheses) for lexical characteristics of stimuli for the three experiments

| Lexical Characteristics       | Experiment 1 and Experiment 2 |                     |                | Experiment 3       |                     |                |
|-------------------------------|-------------------------------|---------------------|----------------|--------------------|---------------------|----------------|
|                               | Low-frequency word            | High-frequency word | Pseudoword     | Low-frequency word | High-frequency word | Pseudoword     |
| Word length                   | 5.00<br>(0.82)                | 5.00<br>(0.82)      | 5.00<br>(0.82) | 6.00<br>(0.82)     | 6.00<br>(0.82)      | 6.00<br>(0.82) |
| Lexical frequency             | 3.00<br>(4.29)                | 94.30<br>(97.08)    | -              | 3.20<br>(1.65)     | 117.44<br>(193.64)  | -              |
| Old 20                        | 1.88<br>(0.35)                | 1.62<br>(0.28)      | 1.93<br>(0.39) | 1.93<br>(0.32)     | 1.79<br>(0.39)      | 1.83<br>(0.24) |
| Number of symmetrical letters | 1.15<br>(0.41)                | 1.04<br>(0.19)      | 1.09<br>(0.29) | 1.50<br>(0.57)     | 1.35<br>(0.68)      | 1.42<br>(0.63) |

### 5.1.6.3. Results

The dataset retained for analysis consisted of 3,060 observations per condition. RTs data, accuracy data and  $BF_{10}$  were fitted using the same procedure as described in Experiments 1 and 2. Mean RTs per condition are presented in Tableau 12.

#### 5.1.6.3.1. RTs

Only the data for words were analyzed. Incorrect responses (4.97% for word targets) and correct responses with RTs less than 300 ms (0.14%) were first excluded from the analyses. Then, trials with outliers, defined as RTs more than 2.5 SD above or below the participant's mean, were excluded (2.70% of the correct answers).

The analysis of RTs showed a significant main effect of Frequency ( $\chi^2 = 183.05$ ,  $t = 13.53$ ,  $p < .001$ ): RTs were shorter for high-frequency than for low-frequency words ( $\Delta RT = 71$  ms). There was also a main effect of Type of Prime ( $\chi^2 = 179.18$ ,  $p < .001$ ): RTs for

identity primes were significantly faster than for mirror primes ( $\Delta RT = 22$  ms,  $z = 7.52$ ,  $p < .001$ ) or for control primes ( $\Delta RT = 40$  ms,  $z = 13.35$ ,  $p < .001$ ) and, critically, there was a significant difference between RTs for mirror and control primes ( $\Delta RT = 18$  ms,  $z = 8.32$ ,  $p < .001$ ). These results were confirmed by Bayesian analysis (Table 3). In addition, the interaction between Frequency and Type of Prime was non-significant ( $\chi^2 = 2.64$ ,  $p = .27$ ).

Tableau 12. Mean response times (in ms) and standard errors (in parentheses) for each experimental condition in Experiment 3.

| Prime condition                   | Target Frequency  |   |
|-----------------------------------|---|---|
|                                   | High frequency  | Low frequency   |
| identity                          | 576 (12)  | 648 (14)  |
| mirror                            | 597 (12)  | 668 (15)  |
| control                           | 616 (12)  | 686 (14)  |
| <i>identity - mirror contrast</i> | <b>-21*</b><br><b>BF<sub>10</sub> &gt; 100; evidence for H1</b> | <b>-20*</b><br><b>BF<sub>10</sub> = 7; evidence for H1</b>      |
| <i>mirror - control contrast</i>  | <b>-19*</b><br><b>BF<sub>10</sub> &gt; 100; evidence for H1</b> | <b>-18*</b><br><b>BF<sub>10</sub> &gt; 100; evidence for H1</b> |

Note : \*  $p < .001$  for post-hoc analysis conducted on priming contrasts with the emmeans R package.

#### 5.1.6.3.2. Accuracy

The analyses of the accuracy data showed a significant main effect of Frequency ( $\chi^2 = 101.77$ ,  $z = 10.08$ ,  $p < .001$ ), with higher error rates for low-frequency than for high-frequency words ( $\Delta ER = 12.10\%$ ). There was significant main effect of Type of Prime ( $\chi^2 = 9.33$ ,  $p < .01$ ): control primes elicited lower error rates than identity primes ( $\Delta ER = 0.96\%$ ,  $z = 3.05$ ,  $p < .05$ ) and no other contrasts reached significance (all  $p > .10$ ). In addition, the interaction between Frequency and Type of Prime was non-significant ( $\chi^2 = 1.03$ ,  $p = .60$ ).

#### 5.1.6.4. Discussion

In Experiment 3, we used the sandwich masked priming method already used in Experiment 2, and we paid careful attention to the control condition in order to preserve the informativeness of symmetrical letters across priming conditions. Results of Experiment 3

revealed a strong mirror priming effect for non-reversal letters, independently of lexical frequency. Moreover, confidence in the reliability of this effect is strengthened for several reasons. First, the total of 3,060 measurements per experimental condition exceeds the recommendation of Brysbaert and Stevens (2018) for ensuring strong statistical power (their recommendation being 1,600 measurements per condition). Second, the modification of the material made it possible to considerably reduce the error rate (5.0%) as compared to Experiments 1 and 2 (9.5% vs. 11.8%, respectively). Third, the modification of the control condition, undertaken in order to maintain the informativeness of symmetrical letters across priming conditions, ensured that the observed priming effect can be attributed solely to the elements that differ between the control and mirror conditions, namely the mirror letters.

### *5.1.7. General Discussion*

The aim of the present research was to reconcile divergent results on the reliability of a mirror-letter facilitatory effect for non-reversal letters. In Experiment 1, using a classical masked priming paradigm, and in line with the previous non-significant results of Perea et al.'s (2011) Experiment 2 where only one letter was in mirror format, we failed to reveal a mirror priming effect. We argued that this failure could be due to the lack of sensitivity of the classical masked priming paradigm. To test this hypothesis, we conducted a second Experiment using the sandwich masked priming paradigm. Results showed a significant mirror priming effect for high-frequency words only. However, we acknowledged that some concerns could possibly limit the interpretation of these results, and more specifically the choice of the control condition. To address these concerns, we conducted a third experiment. We found a graded priming effect, with RTs for Identity primes < Mirror primes < Control primes. This pattern was in line with Winkler and Perea (2018), who found the same graded effect on RTs in English readers with an internal mirror rotation of letters (**msle-make**), but not with Duñabeitia et al. (2011), who found Identity primes = Mirror primes < Control primes on N250 with both internal and full

mirror rotation of letters (Experiment 1: **op91630i0n-operaci0n**, Experiment 2: **st290-cesta**), and also not with Perea et al. (2011, Experiment 2 and 3), who found Identity primes < Mirror primes = Control primes on RTs with only one mirror rotation of letters (**arena-ARENA**). Additionally, our graded priming effect acted purely additively with Lexical Frequency. Overall, these results provide new evidence in support of a facilitatory letter effect for non-reversal letters.

However, given that a graded priming effect was found, it seems that complete mirror invariance preservation for such letters is not the most likely hypothesis. Alternative explanations of our findings are therefore discussed below.

#### **5.1.7.1. How does the priming paradigm constrain the mirror priming effect?**

The choice of the sandwich priming paradigm was motivated by the discrepancy between the absence of mirror priming with conventional masked priming (Experiment 2 of Perea et al. 2011) and the presence of such an effect in a masked prime same-different matching task (Winskyel & Perea, 2018). Several studies have reported the same discrepancy between these two paradigms (Davis & Lupker, 2017; Lupker et al., 2020). The most common explanation refers to the contamination of response times in conventional masked priming when used in combination with the lexical decision task by the lexical competition which occurs during a post-orthographic stage. In contrast, the masked same-different matching paradigm is insensitive to this kind of contamination because the matching process between the reference word and the target does not require activation of lexical representations (Kinoshita & Norris, 2009; Norris & Kinoshita, 2008; but see Kelly et al., 2013). Therefore, the suppression of lexical competition would make it possible to render prelexical orthographic effects more salient. Unlike in Experiment 1, the sandwich masked priming method used in Experiments 2 and 3 permits us to address this issue. This reduction of lexical competition was associated with a

mirror priming effect in line with Winkler and Perea (2018) in a masked same-different matching paradigm with internal mirror rotation of letters. On the other hand, in Experiment 1, in which there was no control of lexical competition, the mirror priming effect was not significant, a finding which is consistent with Perea et al. (2011) in which only one letter was in mirror format.

While the explanation in terms of the reduction of lexical competition has generally been favored over the others, Davis and Lupker (2017) concede “that the exact mechanisms underlying sandwich priming are not fully understood”. One alternative explanation suggested by these authors is that the priming effect could be generated by the activation of a composite prime containing orthographic information from both the initial prime (target) and the prime itself. For example, the brief presentation of the initial target might make it possible to extract orthographic information only from the first three letters (e.g., gau???) for the target GAUCHE). Next, the orthographic information from the subsequent prime is integrated to form a mixed prime (gau**ch**é) containing both canonical and mirror orthographic information. The possibility that our mirror priming effect could be obtained on the basis of such canonical orthographic information (gau\*\*\*) cannot be excluded and might explain why a graded effect was obtained. However, such an assumption contradicts a general consensus according to which the presentation of a new string of letters interrupts the processing of the previous one. Moreover, there is no doubt that such a process would increase the activation of whole-word lexical representations. Assuming that orthographic processing and lexical access are partially ordered, the fact that mirror priming and lexical frequency produce additive effects argues in favor of the contribution of prelexical processes in the mirror priming effect and limits the role of global lexical activation.

### **5.1.7.2. Does visual similarity between mirror-letter primes and targets play a role in the mirror priming effect?**

A second step in our discussion is to examine if visual similarity between mirror-letter primes and targets can generate the graded priming effect.

Firstly, the mirror priming effect observed in Experiment 2 could be accounted for by the close resemblance to letters of mirror primes as compared to control primes. Indeed, the control primes were digit strings. Some evidence exists in favor of distinct processes for digits and letter strings, at both the behavioral (Duñabeitia et al., 2012; Massol et al., 2013) and neural levels (for a discussion, see Hannagan et al., 2015). Therefore, the mirror priming effect in Experiment 2 could be due to the fact that mirror primes benefit from their visual similarity with targets by pre-activating the letter-string processing network, which cannot be pre-activated by digit-string control primes. To address these concerns, we decided to design a third experiment in which we used letter strings as control primes in order to rule out this alternative account.

Secondly, considering that “the most stable existing attractor for a mirror-letter will undeniably be the correct letter, due to the high visual overlap between them” (Duñabeitia et al., 2011), one can argue that the mirror effect in Experiment 3 was not orthographic per se, but simply reflects the visual similarity between mirror primes and targets, as compared to the visual similarity between control primes and targets. However, these authors demonstrated that mirror priming was independent of visual similarity. In our three experiments, this concern was addressed by presenting the prime in lowercase and the target in uppercase. This type of manipulation is common in masked priming experiments to ensure that the observed priming effect can be attributed to the activation of abstract letter representations by eliminating any influence due to a purely visual overlap between the prime and the target.

Nevertheless, and thirdly, one can argue that many lower- and upper-case letters share most of their features. Two types of letters can be distinguished: similar letters (e.g., c/C, u/U)



and dissimilar letters (e.g., a/A, e/E). Among similar letters, symmetrical letters (e.g., u/U) and non-symmetrical ones (e.g., c/C) can be distinguished.

On the one hand, the first critical point concerns the contribution of symmetrical letters in the observed mirror priming effect. Mirror primes contain symmetrical letters which have identical canonical and mirror representations. These symmetrical letters can provide enough information to activate the representation of the target word. For example, the target “GAUCHE” could be primed by the mirror prime (“**ɥsuɔɹɐ**”) only on the basis of the canonical letter (“\*\*u\*\*”) but not by the control prime “123456”, which contains no valid orthographic information (“\*\*”) to prime the target. If this is indeed the case, mirror letter processing is unnecessary for explaining the mirror priming effect: the priming effect could be solely attributable to the contribution of symmetrical letters. Nevertheless, it seems unlikely that this account could explain the size of the observed mirror priming effect. Firstly, this contribution should have been greater for frequent words than for rare words, something which was not observed in our results. Secondly, particular attention was paid to minimizing the number of symmetrical letters per word, with each word containing at most 2 symmetrical letters. Moreover, in Experiment 3, symmetrical letters were maintained across the three priming conditions. Thus, control and mirror primes did not differ in terms of the symmetrical letters (e.g., mirror prime: **ɥsuɔɹɐ**, control prime: **ɥɥɥɥ**). Consequently, the priming effect could only be attributed to the information not shared between these two primes, i.e., the correct mirror letters.

On the other hand, even if symmetrical letters represent a large percentage of similar letters in the Latin alphabet (11/16), the remaining similar letters were not controlled (c, f, k, s, z). The latter do not share a strict visual overlap in the mirror condition (c/C). However, given that visual configurations are preserved in the lowercase mirror letters, these letters could act as a visual attractor for the uppercase letters of the target. In fact, some studies using an

alphabetic decision task in a masked priming paradigm (e.g., Bowers et al., 1998; Jacobs & Grainger, 1991) found greater masked priming effects across lower- and uppercase versions of the same letter when they were visually similar (c–C) than when they were visually dissimilar (a–A) (for a synthesis, see Carreiras et al., 2012). To rule out this alternative explanation, we conducted a supplementary analysis on Experiment 3 (see Supplemental Material for more details). These analyses confirmed that the priming effect was not modulated by the visual similarity of the letters.

### **5.1.7.3. How to explain the graded mirror-letter facilitatory priming effect?**

A first account, provided by the Local Combinations Detector model of Dehaene et al. (2005), could explain how mirror letters can produce a graded facilitatory priming effect. In the LCD model, abstract letter representations are reached through a hierarchical activation of lower-level feature detectors. At the lowest level, these detectors simply respond to orientation features. Then, the combined activation of these detectors permits the activation of a higher-level detector which codes for letters in a specific case. Next, these specific-letter detectors send feedforward activation to higher-level detectors which respond to letters independently of case. This mechanism is used to code abstract representations for a large variety of letters with physical variations (size, font, etc.). As mentioned by Dehaene et al. (2005), the system is sufficiently flexible to identify letters whose canonical format has been distorted. In the case of mirror letters, the redundancy between mirror letters and their canonical format could be sufficient to at least partly activate the feature detector for the canonical letter and, in turn, activate the higher-level abstract letter representations. The priming effect could be graded as a result of this partial activation of detectors. Such an explanation is in line with behavioral evidence showing a graded priming effect for visually similar letters (neutral-NEUTRAL < nevtral-NEUTRAL < neztral-NEURAL; Marcet and Perea, 2017; for electrophysiological evidence of this effect, see Gutiérrez-Sigut et al., 2019). However, as pointed out by Marcet

and Perea (2017), future studies are needed to specify how letter features (i.e., lines, curves, intersections, terminations) are dynamically weighted during the initial phases of word processing and how they are mapped onto abstract representations.

An alternative account, referred as regularization of letter-like characters, is provided by Carreiras et al. (2007). For these authors, the mapping of letters onto abstract letter representations does not operate in a fully feedforward manner, unlike in the LCD model, but is instead influenced by feedback activation of whole-word orthographic representations. Their main idea is that in a task requiring access to abstract letter representations, the system is tuned to regularized letter-like units. This could explain Perea et al.'s (2008) results, in which the priming effect was similar for target words (MATERIAL) when the prime was fully alphabetic (MATERIAL) compared to when it contained letter-like numbers (M4T3R14L) ("1" regularized as "I", "2" as "S", ...). In our study, the mirror-letter prime "ɹ" would be regularized as "a". Moreover, considering that this regularization process was only observed for words, Carreiras et al. (2007) proposed that the mapping of letter-like representations onto abstract letter representations is enabled by the activation provided by the whole-word orthographic representation, as has been highlighted by electrophysiological data (Molinaro et al., 2010). This proposal needs to be carefully considered here since the initial prime in the sandwich procedure pre-activates a whole-word representation which could, in turn, reinforce the influence of the regularization process. Thus, the mirror prime would be regularized (**ɹsuehɛ** in **gauche**), but partial regularization of letter-like character across primes would result in a graded priming effect. By contrast, even if the control prime was regularized (**ʎʎʎʎ** in **tfutrk**), no reliable information could be extracted to facilitate target processing.

These two alternative accounts provide clear, testable predictions. As Duñabeitia et al. (2013) proposed, future studies need to be performed to explore the exploitation of mirror information embedded in words as well as in pseudowords. On the one hand, according to the

LCD proposal, this should operate in the same way across words and pseudowords. On the other, the regularization proposal postulates that mirror information can only be extracted from words because pseudowords do not have a stored lexical representation which could permit feedback regularization. Hence, future studies could design an *experimentum crucis* in order to test these two alternatives. Moreover, the exact way in which the mirror-letter information is exploited at the level of abstract representations in the sandwich procedure remains to be clarified.

### **5.1.8. Conclusion**

The present study makes it possible to reconcile the observed discrepancy in the literature regarding the reliability of a mirror-letter facilitatory effect for non-reversal letters. Results of Experiment 1 provided evidence in favor of the lack of sensitivity of the conventional masked priming method to the mirror priming effect. In Experiments 2 and 3, we showed that the use of a method that is more sensitive to orthographic effects makes it possible to reveal a mirror effect for non-reversal letters. The way in which mirror letters activate abstract letter representations remains to be clarified. The use of a technique such as EEG, which permits high temporal resolution, would be useful for dissociating bottom-up and top-down process which might compete during the identification of mirror letters.

## **5.2.Étude 6. Étude de la coévolution des stratégies de décodage phonologique et d'encodage orthographique à grains fins.**

### ***5.2.1. Objectifs***

Dans cette sixième étude, nous avons examiné la contribution relative des unités phonologiques et morphologiques au processus de reconnaissance du mot écrit dans le contexte de l'apprentissage de la lecture. Comme indiqué dans la partie introductive, les unités phonologiques jouent un rôle crucial dans les premières étapes de l'apprentissage de la lecture en permettant la mise en œuvre de la procédure de décodage phonologique. Cette procédure est progressivement remplacée par une stratégie de reconnaissance directe des mots écrits grâce à l'interface orthographique. Dans le cadre de cette recherche, nous avons particulièrement étudié la voie à grain grossier de cette interface, qui permet un accès rapide à la représentation orthographique en utilisant un codage flexible de la position des lettres. Cependant, l'interface orthographique dispose également d'une voie à grain fin, qui utilise un encodage précis de la position des lettres pour permettre l'accès à des unités sous-lexicales, telles que les morphèmes, pour lesquelles cette information est cruciale. Lors de l'apprentissage de la lecture, le développement de l'interface orthographique devrait conduire au renforcement de la sensibilité du processus de reconnaissance du mot écrit aux unités morphémiques. Cette proposition conduit à envisager des trajectoires développementales opposées pour l'utilisation des unités phonologiques et morphologiques dans le processus de reconnaissance du mot écrit.

Pour tester cette hypothèse, nous avons utilisé une tâche de décision lexicale impliquant des pseudo-mots, administrée à des apprentis lecteurs de la première à la cinquième année d'apprentissage. Nous avons manipulé les pseudo-mots pour obtenir deux effets expérimentaux : l'effet d'interférence Pseudo-Homophone (PsH) et l'effet d'interférence Pseudo-Morphémique (PsM). Ces deux effets sont considérés comme des signatures empiriques du recours respectif aux unités phonologiques et aux unités morphologiques lors de la reconnaissance du mot écrit.

Ainsi, selon nos hypothèses, nous nous attendions à observer une diminution de l'effet PsH et une augmentation de l'effet PsM au cours de l'apprentissage de la lecture.

**Phonological decoding and morpho-orthographic decomposition: complementary routes  
during learning to read.**

Brice Brossette<sup>1†\*</sup>, Élise Lefèvre<sup>1†</sup>, Elisabeth Beyersmann<sup>2</sup>, Eddy Cavalli<sup>1</sup>, Jonathan Grainger<sup>3</sup>  
& Bernard Lété<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Laboratoire d'Étude des Mécanismes Cognitifs, Lyon 2 University, Lyon, France*

<sup>2</sup> *School of Psychological Sciences, Macquarie University, Sydney, NSW, Australia*

<sup>3</sup> *Laboratoire de Psychologie Cognitive, CNRS & Aix-Marseille University, Marseille, France*

Under review in Scientific Studies of Reading (SSR)

† These authors contributed equally to this work.

\*Corresponding author: Brice Brossette, Laboratoire d'Étude des Mécanismes Cognitifs, 5  
Avenue Pierre Mendès France, 69500 Bron, France, Email: [brice.brossette@univ-lyon2.fr](mailto:brice.brossette@univ-lyon2.fr)

### 5.2.2. *Abstract*

**Purpose.** We examined the reliance on phonological decoding and morpho-orthographic decomposition strategies in developing and skilled readers of French.

**Method.** A lexical decision experiment was conducted where the critical stimuli were four types of nonword all derived from the same base-word, such as the French word *visage* (face) in the following examples: 1) pseudo-homophones (PsH; e.g., *visaje*); 2) orthographic controls for PsH nonwords (e.g., *visape*); 3) pseudo-morphemic nonwords (PsM; e.g., *visageable*); and 4) orthographic controls for PsM nonwords (e.g., *visagealle*, where *alle* is not a suffix in French). Responses to PsH and PsM nonwords and their controls were studied in 3 groups of school children (grades 1, 2, and 5) and one group of skilled adult readers.

**Results.** PsH interference effects (i.e., more errors to PsH nonwords than to the corresponding controls) decreased during reading acquisition to become non-significant in skilled readers. Interestingly, the opposite pattern was seen in PsM interference effects (measured also in terms of accuracy), which were already significant in Grade 1 and increased during reading development to reach their maximum in skilled readers.

**Conclusion.** These results point toward opposing developmental trajectories in the use of phonological and morphological information when learning to silently read for meaning.



### ***5.2.3. Introduction***

Visual word recognition is a key component of reading proficiency (Cutting & Scarborough, 2006). In most models of reading acquisition, beginning readers initially have access to the meanings of words by applying spelling-to-sound translation on letters decoded serially (Ehri, 1995; Grainger & Ziegler, 2011; Seymour, 1997; Share, 1995; Ziegler & Goswami, 2005). Each successful decoding through this orthography-phonology-meaning route is assumed to help develop a direct connection between orthography and meaning, which is no longer mediated by using phonological units (Share, 1995). The emergence of a direct orthography-meaning route is thought to support more automatic word recognition processes for more efficient silent reading for meaning (Coltheart et al., 2001; Diependaele et al., 2010; Grainger & Ferrand, 1994; Grainger & Holcomb, 2009; Grainger & Ziegler, 2011; Perry et al., 2007, 2010). As described by Grainger and Ziegler (2011), automatic visual word recognition is achieved principally via the parallel processing of letter identities and their positions thus delegating phonological decoding to a secondary role.

More precisely, Grainger and Ziegler's (2011) dual-route model hypothesized that skilled readers process written words using two types of sublexical orthographic representation. On the one hand, a coarse-grained orthographic code enables flexible letter-position coding, which provides fast access to whole-word orthographic representations. A well-known manifestation of this coarse-grained code is the transposed-letter effect which reflects the tendency of skilled readers to confuse, to a larger extent, a base-word with a transposed-letter nonword (e.g., judge with jugde) than with a replacement-letter nonword (e.g., judge with jupte; see Blythe et al., 2014; Grainger, 2008; Guerrera & Forster, 2008; Perea & Lupker, 2004). In an innovative study, Grainger et al. (2012) investigated the development of the coarse-grained route by comparing the size of the pseudo-homophone (PsH) effect (i.e., the difficulty to reject pseudo-words that can be pronounced like a real word, for example, BRANE can be pronounced

to sound like the word BRAIN) and the transposed-letter effect (i.e., the difficulty to reject a pseudo-word created by the transposition of two letters, such as TALBE derived from the word TABLE) in a lexical decision task. Results showed that children exhibit large PsH effects in Grade 1 (44.61 %), which continuously decreased over reading acquisition (16.07% in Grade 5, and only 4.6% in adults). Interestingly, the transposed-letter effect followed the opposite trajectory with the effect increasing as reading level increased (starting at 8.24% in Grade 1 and reaching its maximum - 12.88% - in Grade 4). These results were interpreted as evidence for a decreased reliance on phonological decoding (the PsH effect) and an increased reliance on the coarse-grained route (the transposed-letter effect) during the course of learning to read.

The present study builds on one additional assumption in the model of Grainger and Ziegler (2011), that the fine-grained code is crucial for precisely encoding not only graphemes but also small morphemic units (i.e., affixes). Morphemes are hypothesized to play a key role in visual word recognition by providing an island of regularity to overcome the arbitrariness of the spelling-meaning relationships (Rastle et al., 2000). Prior research has shown that although children already have awareness for morphological structures in their oral language from a pre-school age (Treiman & Bourassa, 2000; Treiman & Cassar, 1997), it takes many years of reading experience for children to develop the kind of automatic, morphological parsing mechanisms that are characteristic of skilled reading (e.g., Beyersmann et al., 2012, 2021; Dawson et al., 2018, 2021; Hasenäcker et al., 2020; Schiff et al., 2012). In the present study we tested pseudo-morphemic (PsM) nonwords as the morphological equivalent of PsH nonwords. More precisely we used PsM nonwords composed of a real stem and affix such as the English example *farmity* composed of the stem *farm* and the suffix *ity*.

A variety of different tasks have been used to tease apart the different component processes involved in reading PsM nonwords, such as masked priming (e.g., Beyersmann et al., 2015; Hasenäcker et al., 2016, 2020), lexical decision (e.g., Casalis et al., 2015; Dawson et al.,

2018; Hasenäcker et al., 2017; Quémart et al., 2012) and reading aloud (Colé et al., 2012; Mousikou et al., 2020). What is typically seen in unprimed lexical decision, which was the task of choice in the current study, is a stepwise pattern showing that it is harder to reject a nonword when it is exhaustively decomposable into two morphemic subunits (*farmity*: i.e., PsM nonwords) than nonwords containing just one embedded morpheme (e.g., *farm* in *farmald* or *ity* in *falmity*), which in turn are harder to reject than non-morphemic control items (*falmald*). This so-called morpheme interference effect (Crepaldi et al., 2010; Taft & Forster, 1975) has been observed in mid-primary school children (in Italian: Burani et al., 2002; in French: Casalis et al., 2015; Quémart et al., 2012; in English: Dawson et al., 2018), with a tendency of becoming more robust throughout reading development (Dawson et al., 2018).

A related approach was used by Hasenäcker and Schroeder (2017) to investigate the developmental trajectory of the use of syllabic structure and morphological structure during learning to read. In a lexical decision task in German, the functional units of mono- and multi-morphemic words and nonwords were highlighted by hyphenation, and this hyphenation either respected syllable or morpheme boundaries. For example, the word FAHRER was hyphenated at the syllable boundary (FAH:RER) in the syllable-congruent condition and the morpheme boundary (FAHR:ER) in the syllable-incongruent/morpheme-congruent condition. Results showed that children rely on different functional units over reading development. On the one hand, second graders showed a preference for syllabic units regardless of lexicality or morphological complexity. On the other hand, fourth graders exhibited the same reliance on syllabic units except for multi-morphemic nonwords, which were harder to reject when the presentation format highlighted morphological units (HELB:ER) rather than syllabic units (HEL:BER). Interestingly, the emphasis on either syllabic or morphological units no longer affected adult word recognition performance. These results are consistent with the hypothesis

that phonological processes (influenced by syllabic structure) have an early influence, whereas morphological processing requires more reading experience.

The present study builds on this prior theoretical and empirical work in an investigation of the time-course of phonological and morphological processes during reading acquisition in three groups of developing readers (from Grade 1 to Grade 5) and one group of adults. To this end, we investigated the developmental trajectory of PsH and PsM interference effects following the same experimental design as used by Grainger et al. (2012), but this time replacing the transposed-letter nonwords with PsM nonwords. We predicted that phonological effects (i.e., PsH interference) should be strong at first and then gradually diminish as reading expertise increases. On the other hand, we expected morphological effects (i.e., PsM interference) to take longer to emerge and gradually increase as reading expertise increases.

#### **5.2.4. Methods**

##### **5.2.4.1. Participants**

One hundred and ninety-four children from public elementary schools were tested at the end of their school year in May: 36 were 1st Graders, 49 were 2nd Graders, and 59 were 5th Graders. All participants were native French speakers with normal or corrected-to-normal 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). The experiment was performed in accordance with relevant guidelines and regulations and in accordance with the Declaration of Helsinki. An additional group of 50 adult students was tested at the University of Lyon. They were between 18- and 30-years age (mean age = 22 years and 11 months, SD = 2 years and 11 months). All participants were pre-tested for their reading fluency (using a French standardized test, Lefavrais, 2005), their inhibitory ability (using a Go/No-go Task), and their morphological knowledge (using a suffix decision task, Cavalli et al., 2017; Martin et al., 2012) and phonological abilities. For the

phonological assessments, we administered phonemic awareness and phonological short-term memory tasks from EVALEC (Sprenger-Charolles et al., 2005), a computerized battery of tests of reading and reading-related skills for French elementary school children. Tableau 13 summarizes the results obtained at these pretests for each group. In addition, a complete description of the pretests is given in the Supplemental Material.

Tableau 13. Mean and standard deviation (in parentheses) per group for each pretest measure\*.

| Pre-Test                              | Group            |                   |                   |                   |
|---------------------------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                                       | Grade 1          | Grade 3           | Grade 5           | Adults            |
| <b>Morphological knowledge</b>        | 3.25<br>(3.54)   | 5.63<br>(3.94)    | 8.42<br>(4.40)    | 10.74<br>(4.20)   |
| <b>Phonemic awareness</b>             | 7.50<br>(2.92)   | 8.61<br>(2.15)    | 9.59<br>(1.49)    | 10.94<br>(1.50)   |
| <b>Phonological short-term memory</b> | 4.86<br>(0.93)   | 4.92<br>(0.79)    | 5.08<br>(0.75)    | 5.26<br>(0.63)    |
| <b>Reading Level</b>                  | 98.81<br>(53.53) | 208.27<br>(78.43) | 289.59<br>(72.93) | 529.28<br>(97.65) |
| <b>Inhibitory abilities</b>           | 18.36<br>(12.73) | 13.88<br>(9.52)   | 6.03<br>(5.49)    | 5.72<br>(4.33)    |

\***Note.** Five children did not complete the morphological pretest, two children did not complete the phonemic awareness pretest, one child did not complete the phonological short-term memory pretest, and three children did not complete the inhibitory ability pretest.

#### 5.2.4.2. Design and Stimuli

Thirty base-words (mean word frequency per million = 172.32, SD = 209.60) were used to construct 120 nonwords divided into four conditions: 30 pseudo-homophones (PsH), 30 pseudo-homophone controls (PsHc), 30 pseudo-morphemes (PsM), and 30 pseudo-morpheme controls (PsMc). Base-word frequencies were obtained from the Manulex database (Lété et al., 2004). All base-words occurred in Grade 1 texts in the Manulex corpus, meaning that these words are regularly encountered by beginning readers.

#### **5.2.4.2.1. Pseudo-homophone nonwords**

Pseudo-homophones (PsH) were obtained by substituting one grapheme of the base-word by another one of the same length associated with the same phonological representation (e.g., base-word: visage, PsH: visaje). The substitutions were made according to substitution rules described by Farioli et al. (2011). Then, pseudo-homophone controls (PsHc) were obtained according to the same principle but by using a grapheme that differs from the original phonological representation (base-word: visage, PsHc: visape). Thus, pseudo-homophones had an illegal orthographic representation (*visaje* is not a legal spelling in French), while pseudo-homophone controls had both illegal orthographic and phonological representations. Pseudo-homophones and their controls were matched on number of syllables, number of letters, orthographic similarity (as measured by the Orthographic Levenshtein Distance 20; Yarkoni et al., 2008), and bigram frequency.

#### **5.2.4.2.2. Pseudo-morphemic nonwords**

Pseudo-morphemic (PsM) nonwords were obtained by adding an existing legal French suffix to the base-word (base-word: visage, PsM: visageable). Then, pseudo-morphemic nonword controls (PsMc) were obtained according to the same principle but by adding a non-affix ending of the same length and of the same number of syllables as the suffix ending (base-word: visage, PsMc: visagealle). Non-morphological endings were obtained by substituting one letter of the suffix in the PsM condition to have a high degree of orthographic overlap between PsM and PsMc nonwords. PsM and PsMc nonwords were matched on number of syllables, numbers of letters, orthographic similarity, and bigram frequency.

#### **5.2.4.2.3. Filler words**

For the purpose of the lexical decision task, 120 words were selected from the Manulex database (Lété et al., 2004). Half were high-frequency words (mean word frequency per

million = 136.24, SD = 243.20) and the other half were low-frequency words (mean word frequency per million = 4.08, SD = 7.07). For each frequency class, half of the words were mono-morphemic, and the other half were morphologically complex. Thus, we obtained: 30 high-frequency monomorphemic words, 30 low-frequency monomorphemic words, 30 high-frequency morphologically complex words, and 30 low-frequency morphologically complex words. Filler words were matched with the critical nonword stimuli on length in letters and number of syllables. The complete set of stimuli are available in the Supplemental Materials.

#### **5.2.4.3. Procedure and apparatus**

Participants were seated in front of a 14-inch laptop computer running *OpenSesame* software (Mathôt et al., 2012) at a viewing distance of approximately 60 cm. The stimuli were displayed in black lowercase in 24-point Courier font on a gray background with a resolution of 1280 x 720 px. Participants were tested in groups of two. The main experiment (lexical decision) lasted around 20-minutes.

Each trial began with a fixation cross for 1000 ms. Then, the fixation cross was replaced by a target stimulus at the center of the screen until the participant's response. Participants were instructed to decide as quickly and as accurately as possible the "L" key if the stimulus was a legal French word and the "M" key otherwise (for left-handed participants the response keys were reversed). Stimuli were divided into five counterbalanced blocks of 24 experimental trials. Blocks and trials within blocks were presented in a randomized order. A practice block of 24 trials was also presented before experimental blocks. To avoid fatigue, a break was offered between each block.

Children were tested in groups of four to six by three experimenters in the same room. The lexical decision task was explained by an experimenter who gave the children examples of words and nonwords written on paper and asked them to respond together and orally if the letter string was a word or a nonword. The experimenter let the children express their opinion before

providing the correct response. Examples were given until the experimenter believed that children had correctly understood the lexical decision task. During the practice trials, experimenters carefully controlled children's seating position and their correct use of the keyboard

### **5.2.5. Results**

The final data set retained for analysis consisted of 23,280 observations. As acknowledged by Grainger et al. (2012), the high percentage of errors for young readers in most developmental studies on reading acquisition makes the use of reaction time (RT) data unreliable. Analyses were therefore only performed on the accuracy data.

Accuracy data were analyzed using generalized linear mixed effects (lme4 package in R; Bates et al., 2015). The GLME analysis was conducted using Group (Grade 1, Grade 3, Grade 5, and Adults), Type of Manipulation (pseudo-homophone vs. pseudo-morpheme) and, Type of Condition (experimental vs. control) as fixed factors. The maximal random structure model that successfully converged was used. We tested the significance of the effects using Type III sum of squares and  $\chi^2$  Wald tests. Post-hoc contrasts were calculated using the emmeans package (Lenth, 2023). Full model outputs are given in the Online Supplemental Materials.

The analyses revealed significant main effects of Group ( $\chi^2 = 160.30, p < .001$ ), Type of Manipulation ( $\chi^2 = 35.24, p < .001$ ), and Type of Condition ( $\chi^2 = 115.17, p < .001$ ). Most importantly, the three-way interaction between Type of Condition, Type of Manipulation and Group was significant ( $\chi^2 = 131.20, p < .001$ ). This three-way interaction reflects the distinct developmental trajectories for pseudo-homophone and pseudo-morpheme effects. The pseudo-homophone effect decreased with age and was no longer significant in Adults ( $\Delta ER = 2.40\%$ ,  $z = 1.81, p = .07$ ). On the contrary, the pseudo-morpheme effect, which was already significant in Grade 1 ( $\Delta ER = 3.20\%$ ,  $z = 2.05, p < .05$ ) increased with age (see planned comparison and



effect sizes reported in Tableau 14). The distinct developmental trajectories for the pseudo-homophone and pseudo-morpheme effects are illustrated in Figure 43.

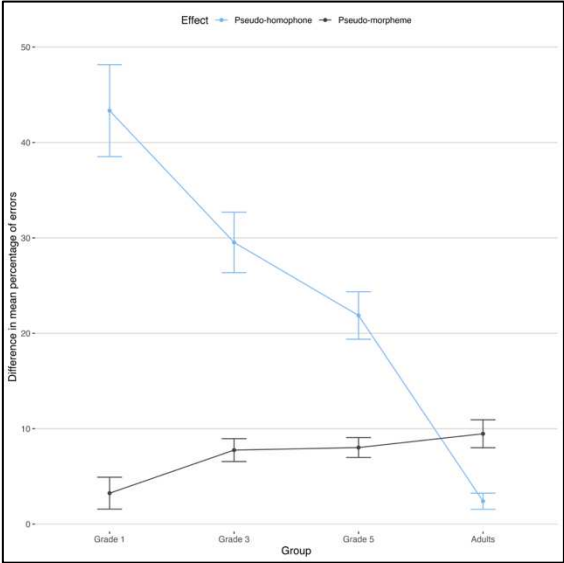


Figure 43. Pseudo-homophone and pseudo-morpheme effects (difference in error rate between experimental and control conditions) for the three groups of children (Grade 1, Grade 3, Grade 5) and the group of adult participants (error bars are standard errors) tested in the present study.

Tableau 14. Mean percentage of error for pseudo-homophones (PsH), pseudo-morphemes (PsM), and their respective controls (PsHc, PsMc) across participant groups (standard errors in parentheses). The difference between PsH and controls reflects the size of the pseudo-homophone effect, whereas the difference between PsM and controls reflects the size of the pseudo-morpheme effect. The significance (*p*-value computed with emmeans package) and the effect size (Cohen's *d*) of these differences were also reported.

| Condition  | Group           |                 |                 |                 |
|------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|            | Grade 1         | Grade 3         | Grade 5         | Adults          |
| PsH        | 74.50<br>(3.11) | 55.00<br>(3.75) | 33.30<br>(3.97) | 7.33<br>(.86)   |
| PsHc       | 31.20<br>(3.15) | 25.40<br>(3.59) | 11.50<br>(1.39) | 4.93<br>(.80)   |
| Difference | 43.30           | 29.60           | 21.80           | 2.40            |
| <i>p</i>   | < .001          | < .001          | < .001          | .07             |
| <i>d</i>   | 2.25            | 1.79            | 1.65            | .43             |
| PsM        | 30.00<br>(3.35) | 29.90<br>(3.20) | 17.90<br>(1.60) | 12.40<br>(1.69) |
| PsMc       | 26.80<br>(3.66) | 22.10<br>(3.26) | 9.83<br>(1.54)  | 2.93<br>(.61)   |
| Difference | 3.20            | 7.80            | 8.07            | 9.47            |
| <i>p</i>   | < .05           | < .001          | < .001          | < .001          |
| <i>d</i>   | .43             | .72             | .99             | 1.93            |

### 5.2.6. Discussion

The present study investigated the developmental trajectory of phonological and morphological processes during reading acquisition, with children in grades 1, 3 and 5, and adults. We did so by examining error rates in a lexical decision task to two types of nonword and their corresponding controls all derived from the same base-word (VISAGE in these examples): 1) pseudo-homophone (PsH) nonwords that can be pronounced like a real word (e.g., *visaje*) and the corresponding orthographic controls (e.g., *visape*); 2) pseudo-morphemic (PsM) nonwords that are formed by an illegal combination of a legal stem and suffix (e.g., *visageable*) and the corresponding controls where the suffix ending was changed to a non-suffix ending (e.g., *visagealle*). The results showed that error rates to PsH nonwords (i.e., the number of times these stimuli were incorrectly accepted as real words in the lexical decision task) decreased during reading acquisition and were non-significant in adults. On the other hand, error rates to PsM nonwords increased during reading acquisition and reached their maximum level in adults.

These findings align well with previous work on the developmental trajectories of the role of phonology and morphology when learning to read. More specifically, the PsH effect shown in our study showed the same developmental trajectory as reported by Grainger et al. (2012) and therefore further confirms the importance of phonological decoding during the early stages of reading acquisition. The progressive decrease of phonological decoding marks its gradual replacement by a process that enables a more efficient access to meaning from print (Grainger, Lété, et al., 2012; Wesseling & Reitsma, 2000). Although part of this more efficient reading route involves direct access to meaning from orthographic representations, a key role is also played by morpho-orthographic representations (e.g., Grainger, 2018). This increasing reliance on morphological processing during reading development has been documented in

numerous developmental studies (Burani et al., 2002; Casalis et al., 2015; Dawson et al., 2018; Quémart et al., 2012).

The key result of the present study, however, is the demonstration of these opposing developmental patterns in the same group of participants. The decreasing effect of phonological processing and the increasing effect of morphological processing in children's reading is likely due to the development of their language skills and their increasing exposure to written language. At the early stages of reading development, children rely heavily on phonological processing, which involves recognizing and manipulating the sounds of language (Castles et al., 2018). As children become more proficient readers, they start to rely more on the orthographic analysis of meaningful units of language, such as prefixes, suffixes, and stem morphemes (Rastle, 2019). This shift in processing strategies may be due to the fact that children's language skills are rapidly developing during this time, and they are exposed to more complex vocabulary and sentence structures. Recognizing the morphological structure of words helps children derive meaning from unfamiliar words. Morphological processing therefore represents the perfect tool to decompose unfamiliar words into smaller, familiar morphemic chunks (Beyersmann et al., 2021). For example, Hasenäcker et al. (2017) reported that German speaking children with a high vocabulary level benefitted earlier (i.e., Grade 2) and from all kinds of morphological construction (i.e., compounds, suffixed and prefixed words) compared to children with a lower vocabulary level. For children with a low vocabulary level, the presence of a suffix or a prefix was found to be detrimental for word recognition. This is in line with the idea that, as readers become more experienced, they rely more on lexical and morphological processing, which involves accessing the meaning of words and morphemes directly from whole-word and morpheme representations in long-term memory (Beyersmann et al., 2012). This not only explains the increased reliance on morphological segmentation, but also implies

that more experienced readers are less likely to rely solely on phonological processing when recognizing words, which is consistent with our observed pattern of findings.

Future research will have to examine the generalizability of pseudo-homophone and pseudo-morpheme effects in children's reading acquisition. It is possible that learning to read in highly productive morphemic languages may involve an even greater reliance on morphological representations relative to non-morphological phonological representations (i.e., phonemes and possibly syllables). Indeed, Finnish children appear to demonstrate greater reliance on morphemic compared to syllabic processing, even in a silent reading task (Haikiö & Vainio, 2018). Finnish first- and second-grade children read sentences with embedded inflected target words that had either syllable-congruent or syllable-incongruent hyphenation, while their eye-movements were registered. The study found that Finnish children in Grades 1 and 2 relied more on inflectional morphemes than syllables in their reading, suggesting that morphological processing plays an important role in the acquisition of Finnish reading skills. As an agglutinative language, Finnish clearly has a rich inflectional morphology, which therefore makes these results less comparable to the current French findings.

### ***5.2.7. Conclusion***

The present study investigated the use of phonological decoding and morpho-orthographic decomposition strategies during the course of learning to read. French speaking children would appear to use both strategies in the initial stages of learning to read. After that, phonological decoding becomes less important and eventually had a non-significant impact on the performance of adult participants in the present study, while the impact of morphological decomposition increased. This demonstrates how different sublexical representations are used to read words during learning to read silently for meaning, and how their impact changes over the course of learning.

## DISCUSSION GENERALE

L'objectif de cette thèse était de caractériser l'hypothèse de la coévolution des mécanismes orthographiques. Cette hypothèse visait à examiner les liens d'interdépendance fonctionnelle entre les mécanismes du modèle du traitement orthographique de Grainger, Dufau, et al. (2016), ainsi que leur développement au cours de l'apprentissage de la lecture. Les mécanismes considérés étaient les mécanismes d'Encodage Position Spécifique (EPS), d'Encodage Position Invariant (EPI) et d'Intégration Spatiale (IS).

Dans les chapitres 1 et 2, l'activité de ces mécanismes a été décrite théoriquement puis évaluée empiriquement à l'aide des tâches d'identification de lettres (TSI), de jugement perceptif (SDM) et de décision lexicale à lettres flanquées (FLLD). Ces tâches devaient respectivement mettre en évidence les signatures empiriques associées à chacun des mécanismes, à savoir : la fonction sérielle de position en W, l'effet de transposition de lettres, et l'effet de facilitation des flanqueurs reliés.

Dans les chapitres 3 et 4, l'activité de ces mécanismes a été approximée à l'aide des tâches de décision alphabétique (AD), de décision lexicale (LD) et de décision grammaticale (GD). Dans le chapitre 3, nous avons proposé que ces trois tâches puissent approximer l'activité des mécanismes EPS, EPI et IS. Puis, dans le chapitre 4, l'activité de ces mécanismes a été examinée en considérant que le temps moyen de réponse par participant dans chacune des tâches était un bon indicateur de l'efficacité des mécanismes considérés.

L'ensemble de cette démarche, illustrée dans la Figure 44, visait à répondre à deux questions principales :

- 1) Quelles sont les relations d'efficacité qu'entretiennent les mécanismes EPS, EPI et IS ?
- 2) Quelle est la trajectoire développementale de la mise en place de ces relations ?

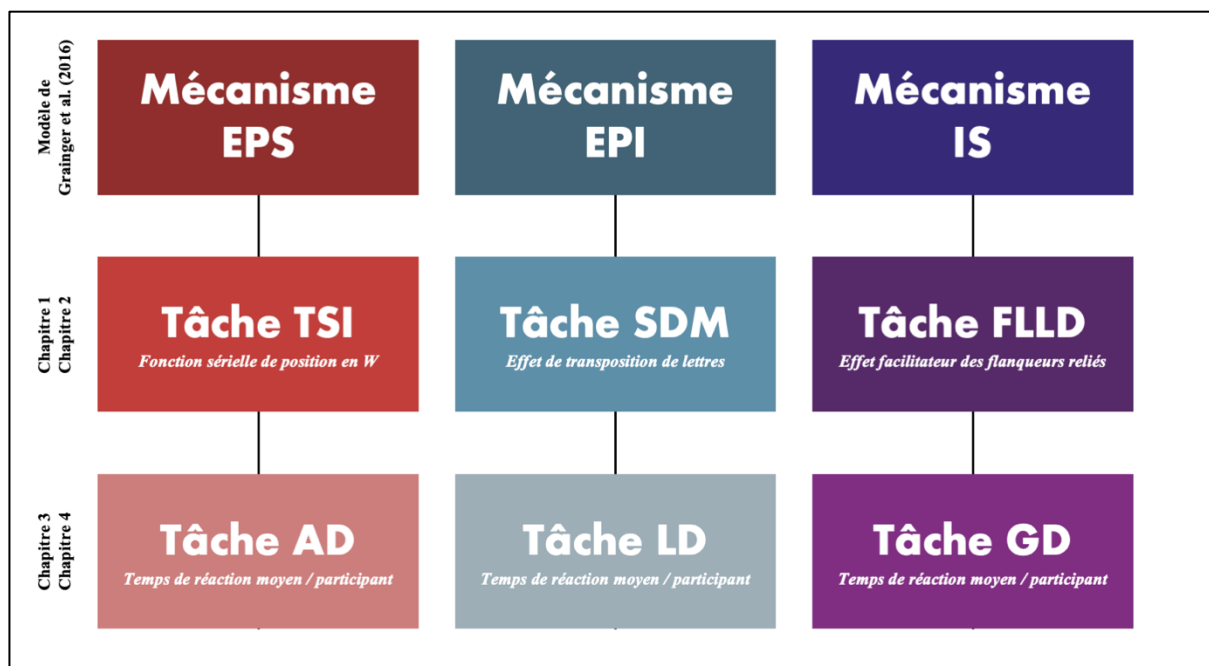


Figure 44. Représentation schématique de la démarche expérimentale visant à opérationnaliser les mécanismes EPS, EPI et IS.

Afin de discuter ces questions, nous proposons dans un premier temps de synthétiser les résultats obtenus dans les études 1 à 4. Puis nous tenterons de voir en quoi ces résultats apportent des réponses à nos questions d'intérêt. Enfin, nous aborderons certains aspects spécifiques de l'étude de l'hypothèse de coévolution qui pourront s'avérer critiques pour les recherches futures. À la suite de cette discussion, les perspectives ouvertes par ce travail de thèse seront abordées à travers la présentation d'un projet de recherche portant sur la modulation des capacités d'identification du mot écrit par la quantité d'exposition à l'écrit au cours de la première année d'apprentissage. Ce projet est en cours d'évaluation dans le cadre de l'appel à projet porté par le consortium AMPIRIC qui est un pôle pilote de formation des enseignants et de recherche pour l'éducation. Une brève conclusion clôturera ce travail.

## 6.1. Synthèse des résultats obtenus

**Étude 1.** L'objectif de l'Étude 1 était d'évaluer l'effet de la durée de présentation dans les tâches TSI, SDM et LD chez des enfants de la 2<sup>ème</sup> à la 5<sup>ème</sup> année d'apprentissage et un groupe d'adulte. Cette étude avait une approche méthodologique qui visait à évaluer la pertinence de

l'allongement de la durée de présentation des stimulus chez l'enfant par rapport à celles utilisées chez l'adulte. Nos résultats ont mis en évidence que l'allongement des durées de présentation permettait une amélioration de l'index de sensibilité, quelle que soit la tâche considérée. Toutefois, les meilleurs lecteurs étaient les principaux bénéficiaires de cet allongement, alors que les moins bons lecteurs avaient des difficultés à en tirer parti. Par ailleurs, l'augmentation de l'index de sensibilité, du fait de l'allongement des durées de présentation, semblait différer selon la tâche considérée, cette augmentation étant beaucoup plus marquée dans les tâches les plus exigeantes en ressources exécutives (TSI et SDM). Enfin, l'analyse de classification a permis de mettre en évidence deux profils de performance orthographique qui pouvaient être dissociés sur la base d'un niveau de lecture proche de celui attendu en moyenne lors de la 5<sup>ème</sup> année d'apprentissage.

*Étude 2.* L'objectif de l'Étude 2 était d'étudier les relations d'efficience entre les mécanismes EPS, EPI, et IS en fonction du niveau de lecture. Pour ce faire, les tâches TSI, SDM, et FLLD ont été administrées à un large groupe de 161 enfants de 6<sup>ème</sup> année. Les analyses réalisées pour chaque tâche ont permis de mettre en évidence la signature empirique associée aux mécanismes EPS, EPI et IS, à savoir la fonction sérielle de position, l'effet de transposition de lettres et l'effet de facilitation des flanqueurs reliés orthographiquement. De manière cohérente avec la littérature scientifique, seuls la fonction sérielle de position et l'effet de transposition de lettres étaient modulés par le niveau de lecture. L'analyse des relations inter-tâches a permis de mettre en évidence que les performances dans les tâches TSI et SDM, d'une part, et dans les tâches SDM et FLLD, d'autre part, corrélaient plus fortement entre elles que les performances dans les tâches TSI et FLLD. Ce pattern de résultat était significatif pour les taux de précision mais pas pour les temps de réponse moyens par participant.

*Étude 3.* Dans le Chapitre 3, nous avons avancé l'hypothèse que la qualité de l'encodage des unités lettres, mots et phrases pouvaient respectivement approximer l'efficience des

mécanismes EPS, EPI et IS. En adoptant cette perspective, nous avons proposé une lecture de l'Étude 3 complémentaire à celle proposée dans notre article de *Scientific Reports* (Brossette et al., 2022) afin de discuter l'hypothèse de la coévolution des mécanismes orthographiques. Les tâches AD, LD et GD, permettant d'approximer l'efficacité des mécanismes EPS, EPI et IS, ont été administrées à un groupe de 48 participants adultes normo-lecteurs. Les résultats ont révélé que les temps de réponses dans les tâches AD et LD, et dans les tâches LD et GD, d'autre part, corrôlaient plus fortement entre eux que les temps de réponses dans les tâches AD et GD. Ce pattern de résultat était significatif après avoir contrôlé l'influence du processus de décision binaire commun aux trois tâches.

**Étude 4.** L'objectif de l'Étude 4 était d'étudier la mise en place des relations d'efficacité entre les mécanismes EPI et IS au cours de l'apprentissage de la lecture. Pour ce faire, les tâches LD et GD ont été administrées à trois groupes d'apprentis lecteurs de 2<sup>ème</sup>, 4<sup>ème</sup> et 6<sup>ème</sup> année. Les résultats ont révélé que tous les groupes étaient capables de reconnaître les mots dans la tâche LD mais que seuls les enfants de 4<sup>ème</sup> et 6<sup>ème</sup> année étaient capables de distinguer les séquences grammaticales des séquences non-grammaticales dans la tâche GD. Par ailleurs, l'analyse de classification a mis en évidence deux profils d'apprentis lecteurs. Les enfants associés au premier profil présentaient un index de sensibilité moyen dans la tâche GD proche de zéro et leurs performances dans les tâches LD et GD corrôlaient faiblement. À l'inverse, les enfants associés au second profil parvenaient à discriminer les séquences grammaticales et cette capacité était fortement corrôlée à leur performance dans la tâche LD. Ces deux profils pouvaient être dissociés de manière satisfaisante sur la base d'un niveau de lecture proche de celui attendu en moyenne lors de la 5<sup>ème</sup> année d'apprentissage.



## **6.2. Réponses aux questions d'intérêt**

### ***6.2.1. Quelles sont les relations d'efficience qu'entretiennent les mécanismes***

#### ***EPS, EPI et IS ?***

Pour rappel, le point de départ de cette question reposait sur le modèle du traitement orthographique de Grainger, Dufau, et al. (2016) à partir duquel nous avons proposé d'isoler trois mécanismes principaux : les mécanismes EPS, EPI, et IS (voir chapitre 1, p.30). Les relations entre ces mécanismes sont régies par des transferts d'information qui sont représentés graphiquement par des flèches (voir la représentation du modèle, p.31). De manière intuitive, nous pouvons considérer que la qualité du traitement de l'information reçue à un niveau dépend de la qualité du traitement antérieur lorsqu'un transfert d'information est effectué. Cependant, Grainger, Dufau, et al. (2016) n'ont jamais formulé cette hypothèse de manière explicite. Nous avons donc proposé que la qualité des traitements du mécanisme EPI dépende de ceux du mécanisme EPS, puis que ceux du mécanisme IS dépendent de ceux des mécanismes EPI et EPS. En outre, nous avons noté que les opérations réalisées à chaque niveau de traitement du modèle de Grainger et al. (2016) étaient de nature intégrative. Cette notion doit être comprise dans le sens où l'organisation des mécanismes orthographiques constitue un système où le "tout serait plus que la somme de ses parties". Cette maxime peut se traduire ici par le fait que la qualité de l'information produite par le mécanisme IS n'est pas la simple somme des traitements opérés par les mécanismes EPS et EPI. En d'autres termes, le mécanisme EPS est nécessaire à la qualité du traitement opéré par le mécanisme IS, mais il n'est pas suffisant à lui seul, car les traitements intermédiaires opérés par le mécanisme EPI créent une information intégrée qui conditionnera la qualité du mécanisme IS. Par conséquent, une faible corrélation devrait être attendue entre la qualité des traitements opérés par le mécanisme EPS et ceux opérés par le mécanisme IS. Cette prédiction est illustrée dans la Figure 45.A. Les Figure 45.B et Figure 45.C présentent respectivement les résultats obtenus dans les Études 2 et 3.

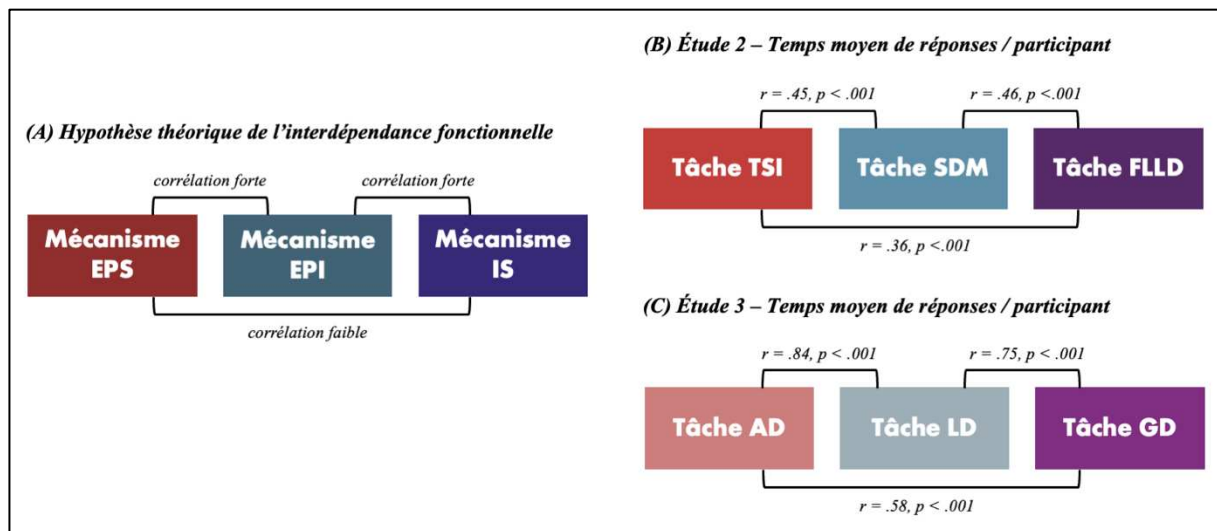


Figure 45. Représentation schématique du patron de résultats attendu par les hypothèses théoriques (A) et celui obtenu dans l'Étude 2 (B) et l'Étude 3 (C)

Dans l'Étude 2, l'activité des mécanismes EPS et EPI et IS a été évaluée à partir du temps moyen de réponse par participant dans les tâches TSI, SDM et FLLD, alors que les tâches AD, LD, et GD ont été utilisées dans l'Étude 3. Dans les deux cas, le patron de résultat obtenu est similaire à celui formulé par nos hypothèses. La consistance de ces résultats, malgré l'hétérogénéité des processus engagés par les différentes tâches, suggère que celles-ci pourraient être sous-tendues par des mécanismes communs. À cet égard, les mécanismes EPS, EPI et IS sont de bons candidats pour expliquer la consistance des patrons de résultats.

Néanmoins, les études portant sur les comparaisons inter-tâches requièrent de pouvoir identifier avec précision les processus partagés ou non entre les tâches. À ce titre, les Étude 2 et Étude 3 divergent quant à leur propension à contrôler le recouvrement des processus inter-tâches. Au-delà de cette question, il est également indispensable de savoir à quel degré les tâches utilisées impliquent les mécanismes considérés. Par exemple, dans le Chapitre 3 nous avons proposé que les tâches AD, LD, et GD reflétaient de manière adéquate l'activité respective des mécanismes EPS, EPI et IS. Toutefois, cet argumentaire reposait essentiellement sur un raisonnement théorique dont la validité empirique reste à démontrer. **Ainsi, la nature des processus engagés par les tâches et leurs éventuels recouvrements pourraient réduire**

**la portée interprétative de nos résultats.** Nous proposons de discuter cet aspect critique dans une section dédiée ci-après.

Malgré les limites que peut présenter ce travail, il est à noter qu'il est le premier à fournir des hypothèses de travail pour explorer les relations d'interdépendance des mécanismes du modèle de Grainger, Dufau, et al. (2016). Les études menées ont permis de confirmer empiriquement les propositions formulées et soutenir la viabilité du concept d'interdépendance fonctionnelle. Dans le même temps, les limites interprétatives et méthodologiques soulevées fourniront des éléments de réflexion importants pour le développement de cet axe de recherche.

### ***6.2.2. Quelle est la trajectoire développementale de la mise en place des relations d'interdépendance ?***

Cette question constituait l'enjeu le plus ambitieux de cette thèse. Pour rappel, l'un de nos objectifs était, d'une part, de décrire le décours temporel de la mise en place des mécanismes EPS, EPI et IS, et, d'autre part, de déterminer dans quelle mesure ce décours temporel était contraint par les relations d'interdépendance fonctionnelle. Nous avons fait l'hypothèse que la mise en place du mécanisme EPS devait être précédée par celle du mécanisme EPI qui devait être elle-même nécessaire à la mise en place du mécanisme IS. La démonstration de cette hypothèse était ambitieuse dans la mesure où il n'existe pas encore de consensus sur la trajectoire développementale propre à chacun de ces mécanismes. Ceci est en partie dû au manque d'études longitudinales, pourtant essentielles pour répondre à ces questions. Notre volonté était donc de réaliser une étude longitudinale décrivant simultanément la trajectoire des mécanismes EPS, EPI et IS lors de l'entrée dans la lecture. Toutefois, ce projet n'a pas pu être concrétisé à cause de la crise sanitaire.

Cette étude a finalement été réalisée sans suivi longitudinal auprès d'un unique groupe de lecteur de 6<sup>ème</sup> année (Étude 2). La structure de cette étude n'a donc pas permis d'apporter de réponse quant à la mise en place des mécanismes orthographiques puisque ceux-ci étaient déjà

opérationnels à cet âge. Finalement, seule l'Étude 4 a permis d'apporter des éléments de réponses. Dans cette étude, nous avons montré que tous les enfants étaient capables d'effectuer la tâche de décision lexicale, mais que seuls les enfants de 4<sup>ème</sup> et 6<sup>ème</sup> année avaient un index de sensibilité supérieur à zéro dans la tâche de décision grammaticale. La bijection que nous avons construite nous a permis d'établir que la mise en place des mécanismes EPI et IS intervenaient dans des phases développementales distinctes. Ce résultat est contraire à l'hypothèse que nous avons proposée dans le Chapitre 1 selon laquelle la mise en place des mécanismes EPI et IS devaient intervenir dans une même phase. Cette proposition initiale était basée sur l'étude de Snell et al. (2021) qui avait montré que les enfants exhibaient un effet facilitateur des flanqueurs reliés orthographiquement (e.g., ro rock ck) dès la première année, suggérant que le mécanisme IS était en place précocement. Nous avons néanmoins suggéré que les contraintes imposées sur le traitement en parallèle des mots dans cette étude étaient relativement faibles (mots courts et fréquents) et que, dans des conditions imposant des contraintes plus fortes, le mécanisme IS aurait été rendu inopérant. C'est précisément la situation qui a pu survenir dans la tâche de décision grammaticale de l'Étude 3. En effet, la tâche utilisée imposait des contraintes plus importantes, notamment en ce qui concerne le niveau de traitement auquel devaient accéder les informations traitées en parallèle. La détection des séquences grammaticales nécessitait, à minima, que la catégorie syntaxique des mots traités en parallèle soit atteinte. Or, les enfants de seconde année n'en étaient pas capables. Ce résultat est compatible avec les résultats de Cauchi et al. (2022) qui ont montré que le mécanisme IS était inopérant pour intégrer spatialement de l'information morphologique chez les enfants d'école primaire. Ainsi, contrairement à ce qui avait été proposé au Chapitre 1, il semblerait que la mise en place des mécanismes EPI et IS interviennent dans des phases développementales dissociées plutôt que commune (voir Figure 46.A). À cet égard, l'analyse de classification réalisée dans l'Étude 4 permet d'apporter des réponses sur le moment où intervient ce changement de phase.

Les enfants ayant atteint un score de 268 au test de l'Alouette, se démarquaient par un index de sensibilité différent de zéro dans la tâche GD et surtout une solide corrélation entre les performances dans les tâches LD et GD. Ce résultat suggère que ce niveau de lecture, atteint en moyenne en 5<sup>ème</sup> année d'apprentissage, constitue le seuil de déclenchement du mécanisme IS dans des conditions de lecture naturelle (voir Figure 46.B). Ainsi, les résultats de l'Étude 4 s'intègrent particulièrement bien au cadre théorique que nous avons construit dans le Chapitre 1, prouvant à ce titre, la viabilité du projet de thèse initial.

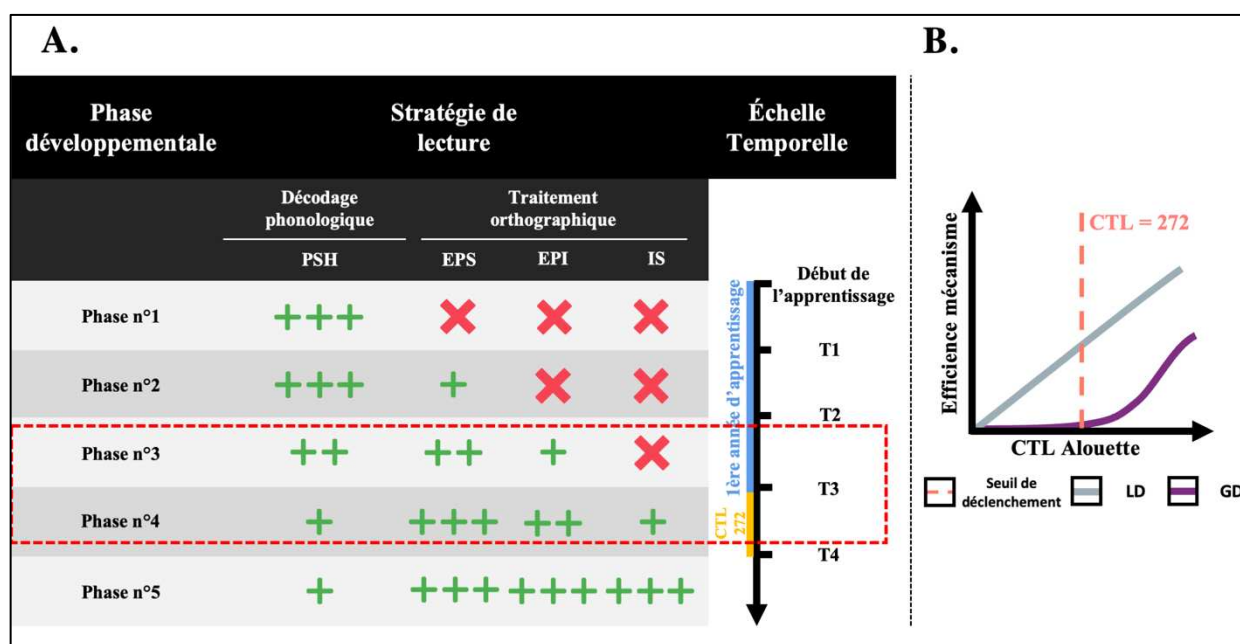


Figure 46. Actualisation de la représentation schématique des hypothèses théoriques formulées dans le chapitre 1.

Par ailleurs, bien que nos travaux n'aient pas permis d'évaluer l'organisation de l'ensemble des phases développementales, ils permettent cependant de formuler des recommandations méthodologiques pour son évaluation future. Dans cette perspective, l'Étude 1 est riche d'enseignement. En effet, dans le projet de thèse initial, nous avons proposé d'adapter les paradigmes expérimentaux pour les apprentis lecteurs en allongeant les durées de présentation. Or, les résultats de l'Étude 1 montrent que l'allongement des durées de présentation a un effet limité sur l'amélioration des performances des faibles lecteurs dans les tâches orthographiques. Le poids des contraintes exécutives imposées par la tâche semblait en revanche être un facteur important de la modulation de la performance. **Ainsi, une adaptation**

**des paradigmes expérimentaux visant à réguler les demandes exécutives pourrait s'avérer plus pertinente afin d'assurer un niveau de performance satisfaisant dans les tâches orthographiques chez l'apprenti lecteur.** Ce point crucial sera discuté dans une section dédiée ci-après.

Par ailleurs, la compréhension de l'organisation des phases développementales nécessite également de choisir une fenêtre temporelle d'observation adaptée. Si l'Étude 4 a permis de montrer que le début de la phase 4 se produisait tardivement, nous continuons de penser que le début des phases 2 et 3 pourrait se produire très précocement et nécessiterait un maillage expérimental très dense consistant à répéter les points de mesure lors de la première année. Cette proposition reste fondée sur les arguments empiriques développés dans le Chapitre 1, issus de la psychologie cognitive et des neurosciences, que nos travaux n'ont pas remis en question. Au sein de cette fenêtre temporelle, les résultats de l'analyse de classification suggèrent que la mesure continue du niveau de lecture pourrait être insuffisamment sensible pour expliquer les différences inter-individuelles. Dans ce cadre, il conviendrait de trouver une mesure plus proximale de facteurs sous-tendant la spécialisation des processus orthographiques. En considérant qu'au niveau neuronal, cette spécialisation s'opèrerait au niveau des aires visuelles sous l'effet de l'exposition répétée à l'écrit, l'usage de mesure de **l'exposition à l'écrit pourrait s'avérer particulièrement sensible aux différences inter-individuelle d'efficience orthographique lors de la première année.** Nous proposons de détailler ces hypothèses de travail dans une section dédiée ci-après.

En résumé, notre travail a confirmé la validité des hypothèses théoriques sur la coévolution des mécanismes orthographiques. Les premières données empiriques suggèrent que les différents mécanismes se développent lors de phases développementales distinctes et que, pour qu'un nouveau mécanisme orthographique puisse se mettre en place, il est nécessaire que le mécanisme se développant durant la phase précédente atteigne un niveau d'efficience

suffisant. Cependant, ces principes n'ont été évalués que pour une partie limitée de l'interface du traitement orthographique, c'est-à-dire la mise en place du mécanisme IS suite à la spécialisation du mécanisme EPI. Les autres phases du développement de cette interface restent à explorer. À cet égard, la réalisation d'études longitudinales durant la première année d'apprentissage, combinée à des mesures d'exposition à l'écrit, pourrait être particulièrement adaptée pour révéler les différentes phases développementales postulées par l'hypothèse de coévolution des mécanismes orthographiques.

### **6.3.Considérations pour l'exploration future de l'hypothèse de la coévolution des mécanismes orthographiques**

#### ***6.3.1. Considération n°1 : Nature des processus engagés et recouvrement inter-tâches.***

Pour que l'interprétation des analyses corrélationnelles inter-tâches proposées dans ce travail soit valide, deux conditions préalables doivent être remplies. Tout d'abord, il est essentiel de s'assurer que les temps de réponse mesurés dans une tâche donnée reflètent l'activité du mécanisme que l'on souhaite étudier. Ensuite, il est crucial de pouvoir contrôler l'influence du recouvrement des processus inter-tâches qui pourraient être à l'origine des corrélations observées. Dans un monde idéal, nous aurions une tâche qui ne sollicite que le mécanisme que nous étudions. Cependant, cela est difficile à réaliser car chaque tâche implique la coordination d'un ensemble de processus, dont le processus que nous souhaitons étudier fait partie. Par exemple, il est souvent nécessaire d'avoir un processus décisionnel pour collecter la réponse comportementale. Pour réaliser des comparaisons inter-tâches, il est donc nécessaire de connaître avec précision les processus impliqués dans chaque tâche et leur potentiel recouvrement.

Cette dernière proposition impose d'être prudent dans l'interprétation des analyses de corrélation menées dans l'Étude 2. En effet, bien que les tâches utilisées dans cette étude soient

spécifiquement conçues pour solliciter les mécanismes orthographiques EPS, EPI et IS, elles diffèrent considérablement les unes des autres. L'Étude 1 a révélé que les tâches TSI et SDM étaient plus difficiles pour les apprentis lecteurs, peut-être en raison de la forte implication des processus de mémoire de travail qui peuvent avoir un impact important sur les performances au-delà de l'influence des mécanismes orthographiques. Par conséquent, il n'est pas clair si la corrélation observée entre les tâches TSI et SDM dans l'Étude 2 est bien due au lien entre les mécanismes EPS et EPI ou au recouvrement des processus de mémoire de travail communs aux deux tâches. Dans l'Étude 3, nous avons essayé de résoudre ce problème en utilisant trois tâches (AD, LD, GD) qui partagent le même processus décisionnel (réponse binaire) et en utilisant une tâche de contrôle pour éliminer l'effet de ce processus sur les corrélations entre les tâches d'intérêt. Les résultats obtenus par cette approche dans l'Étude 3 ont permis de confirmer le patron de résultat obtenu dans l'Étude 2.

Deux nuances doivent néanmoins être apportées. Tout d'abord, la validité de l'approche utilisée dans l'Étude 3 dépend de la nature de la tâche de contrôle employée. Pour rappel, la tâche de contrôle consistait à déterminer si l'image présentée est une entité vivante ou non. Certains pourraient soutenir que cette tâche n'est pas une bonne mesure de référence pour le processus de décision binaire, car la variabilité observée dans cette tâche pourrait s'expliquer par le fait que les participants ayant de meilleures compétences en identification des mots ont des compétences linguistiques supérieures, conduisant à de meilleures performances dans la tâche de catégorisation. Les performances dans cette tâche ne reflèteraient alors pas l'activité du processus de décision binaire. D'autres pourraient soutenir que la tâche de contrôle utilisée est susceptible d'éliminer plus de variance pour les tâches dont les caractéristiques de distribution sont similaires. En effet, étant donné que les tâches de décision diffèrent beaucoup en termes de distribution (Andrews & Heathcote, 2001), il est possible que la part de variance éliminée pour chaque tâche soit inégale, en dépit du fait que le processus de décision binaire



explique une part constante de variance à travers les tâches. Bien que cette possibilité ait été écartée dans nos analyses, les deux contre-arguments que nous venons de décrire soulèvent la difficulté de construire une tâche de contrôle adaptée.

Deuxièmement, et de manière critique, la portée de nos interprétations repose sur l'assertion selon laquelle les tâches AD, LD, et GD reflètent l'activité des mécanismes EPS, EPI et IS. Cette assertion a été largement développée sur le plan théorique dans le Chapitre 3, mais elle ne dispose pas de soutien empirique solide. Afin de confirmer la portée de ce résultat, il serait nécessaire de déterminer empiriquement dans quelle mesure la bijection entre les tâches AD, LD et GD et les mécanismes EPS, EPI et IS est valide. Un moyen d'y parvenir serait d'enregistrer la performance des participants dans les tâches AD, LD et GD, puis d'évaluer la signature empirique associée aux mécanismes EPS, EPI et IS pour chaque participant. Ainsi, chaque participant serait défini par un vecteur à 6 dimensions. Nous pourrions ensuite utiliser une analyse en composantes principales qui est un outil statistique utilisée dans les études en psychologie pour identifier les dimensions sous-jacentes à un ensemble multidimensionnel de données (e.g., Carreiras et al., 1997). Son objectif est de réduire le nombre de dimensions d'un ensemble de données afin d'expliquer de manière plus parcimonieuse la variance des données. Dans notre cas, nous pourrions faire l'hypothèse que le résultat de l'analyse en composantes principales ferait émerger quatre dimensions : (1) une dimension associée au processus de décision binaire dans laquelle la charge des tâches AD, LD, et GD serait équivalente, (2) une dimension où la charge de la tâche AD et de la signature empirique du mécanisme EPS serait importante, (3) une dimension où la charge de la tâche LD et la signature empirique du mécanisme EPI seraient importantes, et (4) une dimension où la charge de la tâche GD et la signature empirique du mécanisme IS seraient importantes. Un tel patron de résultat permettrait de confirmer la validité de la bijection entre les tâches AD, LD, GD et les mécanismes EPS, EPI, IS proposée dans le Chapitre 3.

Quelles que soient les solutions retenues, nos travaux démontrent que la réalisation de comparaison inter tâches est un exercice complexe qui nécessite un travail méthodologique rigoureux qui doit recevoir une attention particulière lors des explorations futures de l'hypothèse de coévolution des mécanismes orthographiques.

### ***6.3.2. Considération n°2 : Adaptation des paradigmes expérimentaux à une population d'apprentis lecteurs.***

Le choix des tâches expérimentales, dont les problématiques ont été évoquées ci-dessus, est généralement basé sur des considérations inhérentes à la population adulte normo-lectrice. De ce fait, leur réutilisation auprès de la population des apprentis lecteurs apparaît paradoxale, car les procédures expérimentales utilisées sont conçues pour solliciter un traitement en parallèle et automatisé des chaînes de lettres, qui est par définition inopérant chez les apprentis lecteurs. Face à ce paradoxe, deux types de solutions ont été proposées dans la littérature.

La première solution couramment utilisée consiste à conserver la procédure expérimentale utilisée chez l'adulte et à ajuster seulement la durée de présentation du stimulus. Cette adaptation est censée donner suffisamment de temps à l'enfant pour traiter le stimulus. Toutefois, plus la durée est prolongée, moins il est possible de garantir que les effets observés proviennent d'un traitement parallèle des lettres. Les résultats de l'Étude 1 montrent que ce type d'adaptation a un effet limité sur l'amélioration des performances des lecteurs les plus faibles. Cette limitation pourrait s'expliquer par le fait que ces lecteurs n'ont pas encore développé les compétences de traitement parallèle des chaînes de lettres et que seule une augmentation significative du temps de présentation leur permettrait de s'engager dans une stratégie de traitement sériel, ce qui ne serait pas optimal puisque les résultats obtenus ne pourraient pas être attribués de manière certaine à une stratégie de traitement parallèle. Par conséquent, l'adaptation des procédures expérimentales consistant à allonger les durées de présentation ne semble pas être une solution appropriée, du moins pour les très jeunes apprentis lecteurs.

La seconde solution utilisée consiste à réaliser des modifications structurales de la procédure expérimentale, par exemple, en présentant de manière simultanée à l'enfant les événements-écrans qui sont présentés de manière séquentielle à l'adulte. Ces modifications visent généralement à réduire les contraintes exécutives inhérentes à la tâche. Cette démarche apparaît prometteuse à la lecture des résultats de l'Étude 1, où les tâches les plus exigeantes sur le plan exécutif étaient celles qui bénéficiaient le plus de l'allongement des durées de présentation. Cependant, les adaptations visant à diminuer la charge exécutive sont généralement réalisées de manière *ad hoc*, et conduisent à l'emploi de procédures expérimentales qui divergent nettement de celles utilisées chez l'adulte, rendant la généralisation des résultats difficiles. Un premier moyen, simple, de résoudre ce problème serait de comparer directement les performances obtenues par les enfants et les adultes pour la nouvelle procédure utilisée, mais cette démarche n'est jamais réalisée.

Toutefois, cette solution n'est pas suffisante en raison de la nature dynamique de l'apprentissage et du développement de l'enfant. En effet, les capacités exécutives de l'enfant évoluent tout au long de son parcours scolaire dans l'enseignement élémentaire. Dans ce contexte, une solution satisfaisante serait d'avoir une procédure expérimentale similaire à celle utilisée chez l'adulte, qui pourrait être adaptée en fonction d'un seul paramètre dont la variation permettrait de réguler la charge exécutive imposée par la tâche en fonction de l'âge de l'enfant. Cependant, ce paramètre ne pourrait pas être la durée de présentation, car comme expliqué précédemment, son allongement risquerait de désengager l'enfant d'un traitement parallèle des chaînes de lettres. Une possibilité serait par exemple de moduler la taille des chaînes de lettres, ce qui pourrait réduire la charge exécutive imposée par la mémoire de travail dans la tâche de jugement perceptif. Pour réaliser ce travail, la première étape consisterait à déterminer avec précision les habiletés nécessaires pour chacune des tâches étudiées. À cet égard, les travaux de Fernández-López, Gómez, et al. (2021) sont révélateurs car ils ont montré que la capacité à

discriminer des bigrammes transposés (TZ-ZT) et des bigrammes substitués (TZ-PH) dans une tâche de jugement perceptif chez des enfants pré-lecteurs (environ 4 ans) était corrélée à un score composite reflétant leurs habiletés mnésiques et perceptives. Bien que cette étude ne permette pas de déterminer exactement l'habileté exécutive sous-tendant la performance dans la tâche perceptive, elle souligne l'intérêt de ce type de démarche et la nécessité de poursuivre les recherches dans ce domaine.

L'objectif final serait de déterminer, pour chaque tâche orthographique, l'habileté exécutive qui explique la plus grande part de la variance des performances chez les enfants. Ensuite, la procédure expérimentale utilisée chez l'adulte serait adaptée en faisant varier un seul paramètre dont le traitement est supposé être sous-tendu par l'habileté exécutive identifiée. La variation de ce paramètre serait opérée en fonction de l'âge de l'enfant, en se basant sur les connaissances que nous avons sur le développement de ladite habileté exécutive. Nous sommes convaincus que ce travail méthodologique est essentiel pour améliorer la généralisation des résultats obtenus et pour mieux comprendre les différentes trajectoires développementales des mécanismes d'EPS, d'EPI et d'IS décrits dans la littérature.

### ***6.3.3. Considération n°3 : Fenêtre temporelle d'étude et rôle de l'exposition à l'écrit.***

Comme mentionné précédemment, nos recherches n'ont pas permis d'explorer les phases de développement n°2 et n°3 envisagées dans le Chapitre 1. Nous considérons toujours que la première année d'apprentissage est la période la plus propice pour étudier ces phases. Cette hypothèse repose sur les résultats d'études sur le traitement orthographique qui soutiennent la crédibilité d'une mise en place précoce des mécanismes EPS et EPI (e.g., Duñabeitia et al., 2015; Grainger, Lété, et al., 2012). Ces données sont cohérentes avec les données de neuro-imagerie qui montrent que l'Aire Visuelle de la Forme des Mots émerge après seulement deux à quatre mois d'apprentissage formel de la lecture. Cependant, la plupart des

Dehaene-Lambertz et al. (2018) études actuelles sur le traitement orthographique ne sont pas capables de détecter ces modifications comportementales, car elles n'effectuent qu'une seule mesure à la fin de la première année d'apprentissage, une fois que ces modifications neuronales se sont déjà produites. Par conséquent, nous pensons qu'un maillage expérimental dense, qui consiste à effectuer des mesures répétées au cours des premiers mois d'apprentissage, est nécessaire pour révéler la mise en place progressive des mécanismes EPS et EPI. Ce dispositif peut également révéler les différences interindividuelles dans la mise en place et la spécialisation des mécanismes orthographiques. En effet, à âge égal, les enfants qui ont déjà appris à lire avant d'avoir suivi un enseignement formel à l'école exhibent une réponse spécialisée de l'AFVM, contrairement à ceux qui ne l'ont pas fait (Monzalvo, 2011). Ces résultats sont compatibles avec d'autres résultats d'imagerie cérébrale fonctionnelle et d'électroencéphalographie, qui suggèrent qu'une exposition répétée à l'écrit peut modifier les réponses neurales en seulement quelques semaines (e.g., Brem et al., 2010; Maurer et al., 2006). L'enjeu de la spécialisation des réseaux neuronaux de la lecture réside donc dans l'exposition à l'écrit, enjeu face auquel tous les enfants ne sont pas égaux (Buckingham et al., 2014).

Dans ce contexte, nous considérons que le niveau de lecture n'est probablement pas le meilleur indicateur de la mise en place de la spécialisation des processus orthographiques pendant la première année d'apprentissage. Premièrement, cela est dû au fait qu'un grand nombre d'enfants ne sauront pas lire lors des premiers points de mesure. Deuxièmement, la première année d'apprentissage est celle où les niveaux de lecture sont les plus homogènes (voir Lefavrais, 2005). Or, étant donné que les modifications neuronales à la base de la mise en place des processus orthographiques résultent de l'exposition répétée à l'écrit, alors une mesure de cette exposition pourrait être un indicateur plus précis que le niveau de lecture. Cependant, la création d'un tel indicateur est complexe. Idéalement, une mesure précise de l'exposition à l'écrit consisterait à comptabiliser chaque fois que l'enfant pose son regard sur un écrit. Cela est

difficile en raison de la diversité des environnements dans lesquels l'enfant évolue (par exemple, l'école versus l'environnement familial), et parce que les principales mesures actuellement disponibles sont indirectes et basées sur l'auto-évaluation (e.g., Evans & Shaw, 2008; Stanovich & West, 1989). Dans ce contexte, nous pensons que le développement de mesures d'exposition plus précises serait un outil précieux pour comprendre les trajectoires individuelles de la mise en place et de la spécialisation des mécanismes orthographiques. Dans la section suivante, nous proposons un programme de recherche visant à élaborer une telle mesure et à évaluer sa pertinence pour expliquer les différences inter-individuelles dans la reconnaissance des mots écrits pendant la première année d'apprentissage de la lecture.

#### **6.4. Perspectives de recherche: DREAM - Developing Reading Exposure and Motivation**

##### ***6.4.1. Proposal's context, positioning, and objectives.***

Learning to read is one of the major challenges children face in school (Hulme & Snowling, 2013). Children must be regularly exposed to writing and persevere despite difficulties to meet this challenge. Indeed, print exposure is a key factor underlying reading performance (Mol & Bus, 2011), and teachers are encouraged to consider print exposure inequalities to adapt their teaching practice (*Pour Enseigner Le Vocabulaire à l'école Maternelle - Guide Vert.*, 2023). Print exposure notably plays a key role in developing brain networks that automate visual word recognition (Dehaene-Lambertz et al., 2018), which is a core component of reading expertise (Gough & Tunmer, 1986).

However, measuring print exposure is a complex problem. The main measures (Evans & Shaw, 2008; Stanovich & West, 1989) are essentially indirect as they do not express the effective processing time of printed material. More fine-grained measures have been obtained with daily diaries (Allen et al., 1992), but social desirability biases are known to contaminate such self-reported measures (DeBaryshe, 1995). To go beyond these measures, we propose

directly quantifying print exposure for reading activities of the school's curriculum (**WP1**). In this respect, an eye tracker will quantify exactly how long the child's gaze will be fixed on the printed material during a school day. Nevertheless, these in-school measures are insufficient because school is not the only place children are exposed to print. The family environment is critical for explaining inter-individual variability in print exposure (Raviv et al., 2004; Scheele et al., 2010). In this context, print exposure is generally measured by asking children to sum up their reading practice over a long period. We argue that such a measure does not capture the dynamic nature of learning. Reading practices change throughout the learning process due to the evolution of reading skills or motivation (Wigfield et al., 2016). To capture this dynamic, we propose to develop a mobile application that allows children and their parents to report their daily reading practice (**WP2**). These data will allow for continuous quantification of print exposure in out-of-school contexts throughout reading acquisition.

Understanding differences in print exposure during reading acquisition also requires consideration of the reader's experience. Indeed, dyslexic children who struggle to read tend to avoid reading practice. A 12-years dyslexic child takes one year to read the amount of information that a normal reader reads in 2 days (Goswami, 2000; Habib & Joly-Pottuz, 2008) because the load generated by reading practice is too high. Based on the concept of training load from sports research (Manzi et al., 2010), we proposed to create a new measure to assess the load generated by reading practice. This *reading load measure* will be the product of objective constraints imposed by the characteristic of the text and the subjective reader's experience (see Figure 47). Objective aspects of reading load will be assessed using the abovementioned measures of print exposure, while subjective aspects will be assessed using measures adapted from research on attitudes toward reading (Mathewson, 1994; Petscher, 2010; Russ, 1989). We believe that reading load will be a powerful indicator for tracking reading practice, identifying struggling readers, and adapting pedagogical practice to maintain each

child in its proximal zone of development (Vygotsky, 1980) by providing an adapted print exposure environment.

To prove the reliability of this measure, we propose to examine how reading load and its subcomponents could explain visual word recognition abilities at the end of Grade 1 (WP3). Since it has already been shown that print exposure modulates visual word recognition abilities in 3rd and 4th Graders (Cunningham & Stanovich, 1990), we want to go beyond and determine at a fine-grained level which factors of reading load drive such modulation. Identifying these factors will help create a learning scenario that maximizes print exposure and reading motivation. In other words, these data will be used to create a learning scenario in which the reading load is regulated so that it is neither too high (in which case the child will avoid reading activities) nor too low (in which case the reading activity will not be stimulating enough to make the child progress). The effectiveness of such a learning scenario will be evaluated in a randomized controlled trial (WP4).

In sum, the present project aims to build a metric of the reading load of reading activities (WP1 and WP2) to identify the ones exerting the most influence on the development of the skills of identification of the written word (WP3) and thus develop efficient learning scenarios (WP4).



Figure 47. The Reading Load and its subcomponents



### **6.4.2. Methodology**

#### **WP1: Quantifying reading load in-school context.**

First, the recurring pedagogical practice of a school week will be identified in collaboration with teachers. Then these activities will be reproduced in the experimental classroom of INSPE with an entire class coming all day long. During activities, children will be continuously monitored on their eye movements, heart rate, and attention. Due to material constraints, only five representative children will be monitored on eye movements and heart rate per day. These recordings will be repeated with six other classes to have sufficient data. Eye movements will be collected with Tobii Glasses 3 and from the gaze point and fixation data we will code reading exposure as either on-print or off-print for every second of data, leading to an on-print time per activity (Rosengrant et al., 2021). Heart rate will be recorded with Fitbit/Empatica watch, leading to a mean heart rate per activity (Elwess & Vogt, 2005). Attention will be recorded for all children with cameras and analyzed according to the method developed by J. Mirault (Mirault, 2021). In addition, each child will fill in a short questionnaire to assess their subjective reading experience at the end of each activity. Figure 48 illustrates this approach.

#### **Deliverables:**

**D1.1** Study report - M10

**D1.2.** Recommendations for teachers' practices - M10

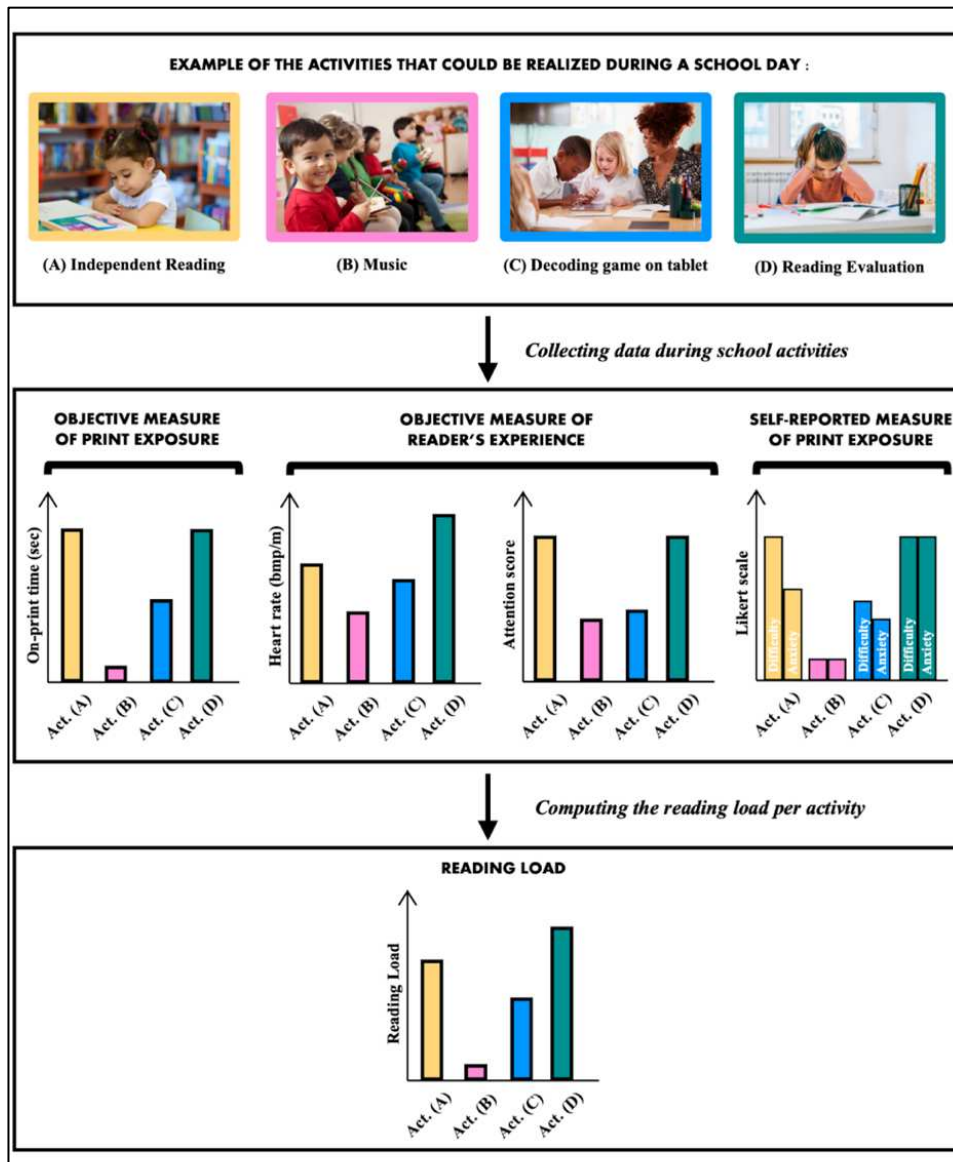


Figure 48. The following diagram illustrates the data collection process we implemented to determine the reading workload based on the type of activity.

## WP2: Quantifying reading load in the out-of-school context

An application will be developed to capture the daily reading activities performed by children (see Figure 49). First, the children, helped by their parents, will select the type of activity they are about to carry out. Then, they will start a timer as soon as they start the activity and stop it once it is over. Finally, the children, helped by their parents, will rate some items related to their subjective reading experience by moving a cursor. These items will be identical to those used in WP1. These measures will allow us to compute the reading load associated

with out-of-school reading activities. The data collected will be stored on Ampiric servers in accordance with the General Data Protection Regulation.

### Deliverables:

**D2.1** Patent application - M1

**D2.2:** A mobile application that quantifies reading load - M6

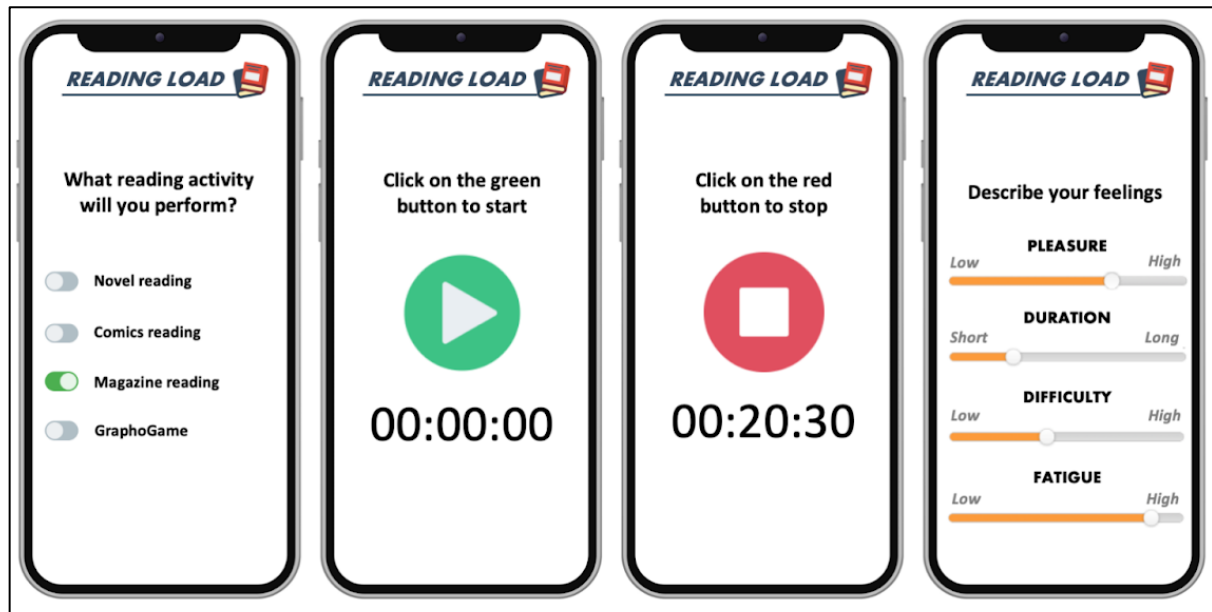


Figure 49. Mock-up of the Reading Load application.

### WP3: Assessing the impact of reading load on visual word recognition (VWR) abilities.

We propose to follow a cohort of 150 first graders for three months, during which (1) teachers will be asked to keep a log of activities performed in school and (2) children will be asked to report daily reading activities performed outside of school using our app. After three months, all children will complete lexical decisions to assess VWR abilities (Katz et al., 2012). In addition, we will assess other reading-related abilities known to be linked with VWR abilities, such as basic visual and attentional processes (Vernet et al., 2022), phonological abilities (Sprenger-Charolles et al., 2005), and vocabulary (Dunn et al., 1993). Finally, children will also complete traditional measures of print exposure, namely the French Version of the Author Recognition Test (Ecalte & Magnan, 2008) and a self-reported questionnaire currently being standardized as part of the *EXPO\_LECT* Ampiric project (Ducrot & Lété, 2022). The

purpose of this study is twofold: (1) quantify the amount of variance explained by reading load and its subcomponents relative to previously known predictors to determine the more efficient reading practices, and (2) compare traditional measures of printing exposure with our new reading load measure.

**Deliverables:**

**D3.1** Study report - M18 (M12 if no renewal)

**D3.2** Recommendations for parents - M18 (M12 if no renewal)

**WP4: Developing a learning scenario that maximizes print exposure and reading motivation.**

Based on WP3's results, we will build a learning scenario that maximizes print exposure and reading motivation. For example, we will identify which reading practices are the most efficient, the minimum daily practice time, or the more appropriate organization of reading practice. Based on this information, 60 first graders, their parents, and teachers will be educated and supported to follow these best practices throughout the year. For this purpose, we propose to create an extension of the mobile application developed in WP2 to continuously analyze daily reading activity practice and make personalized recommendations to each child. For example, if a child is overwhelmed after reading novels for several days, the application can suggest a more fun activity, such as playing a reading game on a tablet. The realization of this support implies that children and parents report their daily reading practice throughout the year. In parallel, a second group of 60 first graders who did not receive any support to enhance their reading practices will serve as a control group. Using a randomized controlled trial, both groups will perform pre-tests and post-tests at the intervention's beginning and end to assess its effects on the core components of reading performance. In this respect, tests similar to WP2 will be used.

**Deliverables:**

**D4.1** Study report - M24

### 6.4.3. Project management

#### 6.4.3.1. Gantt Diagramm

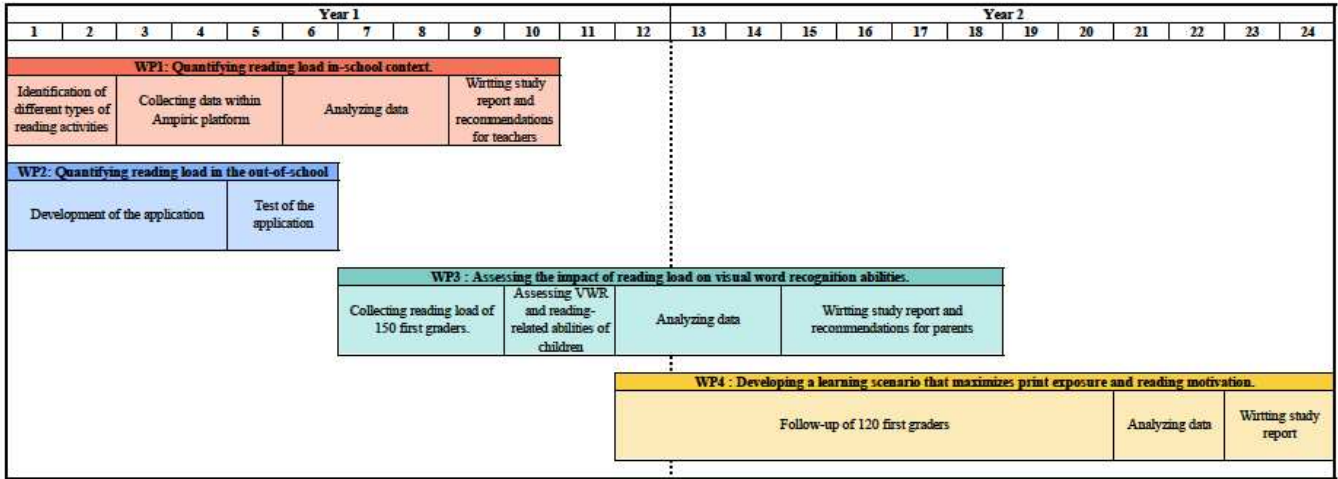


Figure 50. Gantt Diagramm

#### 6.4.3.2. Research Team

**B. Brossette (cand.)** has a solid interdisciplinary background in cognitive science and currently completing a Ph.D. fund by the Ecole Normale Supérieure de Lyon. His research aims to unveil the developmental trends of orthographic processing underlying visual word recognition. He also collaborates with the Lalilo company to ensure the transfer of scientific knowledge to the educational community.

**S. Ducrot (sup.)** has strong expertise in studying reading development and implementing remediation interventions which were rewarded by a Women Innovation Awards in 2017. She recently obtained Ampiric funding to standardize print-exposure questionnaires, which will support strong synergy with DREAM.

**J. Mirault (col.)** is researching the engineer in charge of the AMPIRIC platform. He has strong expertise in setting up protocols under ecological conditions, as well as in collecting and processing oculomotor data.

**J. Ziegler (col.)** is a leading international reading acquisition expert. He is deeply committed to the educational community, as evidenced by his responsibilities within the scientific council of the French national education system and the executive team of the Ampiric project.

#### ***6.4.4. Impact and benefits.***

**Scientific Impact.** The project will provide new methods for quantifying exposure to writing during the first year of learning and evaluate its impact on the development of visual word recognition abilities. At least three publications in international peer-reviewed journals are expected (**D1.1**, **D3.1**, and **D4.1**). We have also planned to participate in both local and international conferences.

**Educational Impact.** The project aims to determine which reading practices maximize print exposure and reading motivation. Thus, with the help of Ampiric's valorization department, we would like to develop a book of "The best practices to enjoy reading" for teachers (**D1.2**) and parents (**D4.2**).

**Industrial Impact.** The project will make available an application to evaluate the reading load, which will be the subject of a patent application (**D2.1**).

## CONCLUSION

L'objectif de cette thèse consistait à explorer une hypothèse originale portant sur la coévolution des mécanismes orthographiques. Ancrée dans le modèle du traitement d'orthographe de Grainger et al. (2016), cette hypothèse s'appuyait sur deux postulats simples : (1) les mécanismes du modèle (EPS, EPI et IS) sont liés par des relations d'interdépendance fonctionnelle, (2) qui vont contraindre leur mise en place respective au cours de l'apprentissage de la lecture. Les études 2 et 3 ont permis d'explorer la viabilité du concept d'interdépendance fonctionnelle en mettant en évidence des relations fortes entre les mécanismes EPS et EPI, et entre les mécanismes EPI et IS. La relation entre les mécanismes EPS et IS s'est révélée plus faible, confirmant la nature intégrative des traitements intermédiaires réalisés par le mécanisme EPI. L'étude 4, a permis de confirmer l'idée que ces relations d'interdépendance fonctionnelle contraignaient la mise en place des mécanismes orthographiques au cours de l'apprentissage de la lecture, en montrant que la mise en place du mécanisme EPI précédait celle du mécanisme IS. Enfin, la section discussion a permis de relever les limites interprétatives de notre travail en soulignant l'importance du travail méthodologique nécessaire à la réalisation de comparaisons inter-tâches dans une perspective développementale. À cet égard, l'Étude 1 a permis de fournir de précieuses recommandations pour l'adaptation des temps de présentation dans les tâches orthographiques chez l'enfant. En somme, ce travail aura permis d'élaborer les premiers éléments de définition d'une conception intégrée et dynamique du modèle de Grainger et al. (2016) et d'en démontrer la validité.

## REFERENCES

- Acha, J., & Perea, M. (2008). The effect of neighborhood frequency in reading: Evidence with transposed-letter neighbors. *Cognition*, *108*(1), 290–300. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2008.02.006>
- Adelman, J. S. (2013). *Visual Word Recognition Volume 1 Models and Methods, Orthography and Phonology*. Psychology Press.
- Aghababian, V., & Nazir, T. A. (2000). Developing Normal Reading Skills: Aspects of the Visual Processes Underlying Word Recognition. *Journal of Experimental Child Psychology*, *76*(2), 123–150. <https://doi.org/10.1006/JECP.1999.2540>
- Ahr, E., Houdé, O., & Borst, G. (2016). Inhibition of the mirror generalization process in reading in school-aged children. *Journal of Experimental Child Psychology*, *145*, 157–165. <https://doi.org/10.1016/J.JECP.2015.12.009>
- Allen, L., Cipielewski, J., & Stanovich, K. E. (1992). Multiple indicators of children's reading habits and attitudes: Construct validity and cognitive correlates. *Journal of Educational Psychology*, *84*(4), 489–503. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.84.4.489>
- Andrews, S. (1996). Lexical Retrieval and Selection Processes: Effects of Transposed-Letter Confusability. *Journal of Memory and Language*, *35*(6), 775–800. <https://doi.org/10.1006/jmla.1996.0040>
- Andrews, S., & Heathcote, A. (2001). Distinguishing Common and Task-Specific Processes in Word Identification: A Matter of Some Moment? *Journal of Experimental Psychology: Learning Memory and Cognition*, *27*(2), 514–544. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.27.2.514>



- 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. <https://doi.org/10.1037/A0029492>
- Appelman, I. B., & Mayzner, M. S. (1981). The letter-frequency effect and the generality of familiarity effects on perception. *Perception & Psychophysics*, 30(5), 436–446. <https://doi.org/10.3758/BF03204839>
- Asano, M., & Yokosawa, K. (2011). Rapid extraction of gist from visual text and its influence on word recognition. *Journal of General Psychology*, 138(2), 127–154. <https://doi.org/10.1080/00221309.2010.542510>
- Ashby, F. G., Prinzmetal, W., Ivry, R., & Maddox, W. T. (1996). A formal theory of feature binding in object perception. *Psychological Review*, 103(1), 165–192. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.103.1.165>
- Baker, C. I., Liu, J., Wald, L. L., Kwong, K. K., Benner, T., & Kanwisher, N. (2007). Visual word processing and experiential origins of functional selectivity in human extrastriate cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(21), 9087–9092. [https://doi.org/10.1073/PNAS.0703300104/SUPPL\\_FILE/07-03300FIG8.PDF](https://doi.org/10.1073/PNAS.0703300104/SUPPL_FILE/07-03300FIG8.PDF)
- Balota, D. A. (1994). Visual word recognition : The journey from features to meaning. . In *Handbook of psycholinguistics* (pp. 303–358). Academic 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.  
<https://doi.org/10.1037/0096-1523.10.3.340>

Balota, D. A., Yap, M. J., & Cortese, M. J. (2006). Visual Word Recognition. In *Handbook of Psycholinguistics* (pp. 285–375). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-012369374-7/50010-9>

Balota, D. A., Yap, M. J., Cortese, M. J., Hutchison, K. A., Kessler, B., Loftis, B., Neely, J. H., Nelson, D. L., Simpson, G. B., & Treiman, R. (2007). The english lexicon project. *Behavior Research Methods*, 39(3), 445–459.  
<https://doi.org/10.3758/BF03193014/METRICS>

Baron, J., & Strawson, C. (1976). Use of orthographic and word-specific knowledge in reading words aloud. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 2(3), 386–393. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.2.3.386>

Bates, D., Mächler, M., Bolker, B. M., & Walker, S. C. (2015). Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1), 1–48.  
<https://doi.org/10.18637/JSS.V067.I01>

Bernard, J. B., & Chung, S. T. (2011). The dependence of crowding on flanker complexity and target–flanker similarity. *Journal of Vision*, 11(8), 1–1. <https://doi.org/10.1167/11.8.1>

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(7), 1306–1326.  
<https://doi.org/10.1080/17470218.2012.656661>

- Beyersmann, E., Cavalli, E., Casalis, S., & Colé, P. (2016). Embedded Stem Priming Effects in Prefixed and Suffixed Pseudowords. *Scientific Studies of Reading, 20*(3), 220–230. <https://doi.org/10.1080/10888438.2016.1140769>
- 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. <https://doi.org/10.1016/J.JECP.2015.06.001>
- 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*. <https://doi.org/10.1016/J.JECP.2021.105140>
- Blythe, H. I., Johnson, R. L., Liversedge, S. P., & Rayner, K. (2014). Reading transposed text: effects of transposed letter distance and consonant-vowel status on eye movements. *Attention, Perception, and Psychophysics, 76*(8), 2424–2440. <https://doi.org/10.3758/S13414-014-0707-2/TABLES/4>
- Blythe, H. I., & Joseph, H. S. S. L. (2011). Children's eye movements during reading. *The Oxford Handbook of Eye Movements*, 895–909. [papers2://publication/uuid/FE5DD9FB-B236-46F0-A48E-E6534194280E](https://doi.org/10.1017/9780199730017.014)
- Borst, G., Ahr, E., Roell, M., & Houdé, O. (2015). The cost of blocking the mirror generalization process in reading: evidence for the role of inhibitory control in discriminating letters with lateral mirror-image counterparts. *Psychonomic Bulletin & Review, 22*(1), 228–234. <https://doi.org/10.3758/s13423-014-0663-9>

- Bouma, H. (1973). Visual interference in the parafoveal recognition of initial and final letters of words. *Vision Research*, *13*(4), 767–782. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(73\)90041-2](https://doi.org/10.1016/0042-6989(73)90041-2)
- Bowers, J. S., Vigliocco, G., & Haan, R. (1998). Orthographic, phonological, and articulatory contributions to masked letter and word priming. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *24*(6), 1705–1719. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.24.6.1705>
- Brem, S., Bach, S., Kucian, K., Guttorm, T. K., Martin, E., Lyytinen, H., Brandeis, D., & Richardson, U. (2010). Brain sensitivity to print emerges when children learn letter-speech sound correspondences. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *107*(17), 7939–7944. <https://doi.org/10.1073/PNAS.0904402107>
- Brossette, B., Grainger, J., Lété, B., & Dufau, S. (2022). On the relations between letter, word, and sentence-level processing during reading. *Scientific Reports 2022 12:1*, *12*(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22587-1>
- Bruner, J. S., & O’ Dowd, D. (1958). A Note on the Informativeness of Parts of Words. *Language and Speech*, *1*(2), 98–101. <https://doi.org/10.1177/002383095800100203>
- Brysbaert, M. (2022). *Chapter Phonological Coding in Visual Language Processing - Brysbaert in Snowling et al (2022)*. <https://doi.org/10.31234/OSF.IO/694VJ>
- Brysbaert, M., Buchmeier, M., Conrad, M., Jacobs, A. M., Bölte, J., & Böhl, A. (2011). The Word Frequency Effect. *Experimental Psychology*, *58*(5), 412–424. <https://doi.org/10.1027/1618-3169/a000123>

- Brysbaert, M., & Stevens, M. (2018). Power Analysis and Effect Size in Mixed Effects Models: A Tutorial. *Journal of Cognition*, 1(1). <https://doi.org/10.5334/joc.10>
- Buckingham, J., Beaman, R., & Wheldall, K. (2014). Why poor children are more likely to become poor readers: the early years. *Educational Review*, 66(4), 428–446. <https://doi.org/10.1080/00131911.2013.795129>
- Burani, C., Marcolini, S., & Stella, G. (2002). How Early Does Morpholexical Reading Develop in Readers of a Shallow Orthography? *Brain and Language*, 81(1–3), 568–586. <https://doi.org/10.1006/BRLN.2001.2548>
- Carroll, J. (1970). An Alternative to Juilland's Usage Coefficient for Lexical Frequencies, and a Proposal for Standard Frequency Index (SFI). *Computer Studies in the Humanities and Verbal Behavior*, 3(2), 61–65. [https://www.ets.org/research/policy\\_research\\_reports/publications/article/1970/ahvt.html](https://www.ets.org/research/policy_research_reports/publications/article/1970/ahvt.html)
- Carreiras, M., Duñabeitia, J. A., & Perea, M. (2007). READING WORDS, NUMB3R5 and \$YMBOL\$. *Trends in Cognitive Sciences*, 11(11), 454–455. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2007.08.007>
- Carreiras, M., Perea, M., & Grainger, J. (1997). Effects of orthographic neighborhood in visual word recognition: cross-task comparisons. *Journal of Experimental Psychology. Learning, Memory, and Cognition*, 23(4), 857–871. <https://doi.org/10.1037//0278-7393.23.4.857>
- Carreiras, M., Perea, M., & Mallouh, R. A. (2012). Priming of abstract letter representations may be universal: The case of Arabic. *Psychonomic Bulletin & Review*, 19(4), 685–690. <https://doi.org/10.3758/s13423-012-0260-8>

- Carroll, J. B. (1970). An Alternative to Juillard's Usage Coefficient for Lexical Frequencies, and a Proposal for Standard Frequency Index (SFI). *Computer Studies in the Humanities and Verbal Behavior*, 3(2), 61–65.
- Casalis, S., Quémart, P., & Duncan, L. G. (2015). How language affects children's use of derivational morphology in visual word and pseudoword processing: Evidence from a cross-language study. *Frontiers in Psychology*, 6(MAR), 452. <https://doi.org/10.3389/FPSYG.2015.00452/ABSTRACT>
- Castles, A., Davis, C., Cavalot, P., & Forster, K. (2007). Tracking the acquisition of orthographic skills in developing readers: Masked priming effects. *Journal of Experimental Child Psychology*, 97(3), 165–182. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2007.01.006>
- Castles, A., Rastle, K., & Nation, K. (2018). Ending the Reading Wars: Reading Acquisition From Novice to Expert. *Psychological Science in the Public Interest*, 19(1), 5–51. [https://doi.org/10.1177/1529100618772271/ASSET/IMAGES/10.1177\\_1529100618772271-IMG1.PNG](https://doi.org/10.1177/1529100618772271/ASSET/IMAGES/10.1177_1529100618772271-IMG1.PNG)
- Cattell, J. M. (1948). The time it takes to see and name objects, 1886. In *Readings in the history of psychology*. (pp. 326–328). Appleton-Century-Crofts. <https://doi.org/10.1037/11304-037>
- 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. <https://doi.org/10.1016/J.JECP.2022.105448>

- Cauchi, C., Lété, B., & Grainger, J. (2020). Orthographic and phonological contributions to flanker effects. *Attention, Perception, and Psychophysics*, *82*(7), 3571–3580. <https://doi.org/10.3758/S13414-020-02023-0/TABLES/4>
- Cavalli, E., Duncan, L. G., Elbro, C., El Ahmadi, A., & Colé, P. (2017). Phonemic-Morphemic dissociation in university students with dyslexia: an index of reading compensation? *Annals of Dyslexia*, *67*(1), 63–84. <https://doi.org/10.1007/S11881-016-0138-Y>
- Chambers, S. M. (1979). Letter and order information in lexical access. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *18*(2), 225–241. [https://doi.org/10.1016/S0022-5371\(79\)90136-1](https://doi.org/10.1016/S0022-5371(79)90136-1)
- Chanceaux, M., & Grainger, J. (2012). Serial position effects in the identification of letters, digits, symbols, and shapes in peripheral vision. *Acta Psychologica*, *141*(2), 149–158. <https://doi.org/10.1016/J.ACTPSY.2012.08.001>
- Chauncey, K., Holcomb, P. J., & Grainger, J. (2008). Effects of stimulus font and size on masked repetition priming: An event-related potentials (ERP) investigation. *https://doi.org/10.1080/01690960701579839*, *23*(1), 183–200. <https://doi.org/10.1080/01690960701579839>
- Chomsky, N. (1957). Syntactic Structures. *Syntactic Structures*. <https://doi.org/10.1515/9783112316009/HTML>
- Chow, G. C. (1960). Tests of Equality Between Sets of Coefficients in Two Linear Regressions. *Econometrica*, *28*(3), 591. <https://doi.org/10.2307/1910133>
- Chung, S. T. L. (2007). Learning to identify crowded letters: Does it improve reading speed? *Vision Research*, *47*(25), 3150–3159. <https://doi.org/10.1016/J.VISRES.2007.08.017>

- Clark, J. J., & O'Regan, J. K. (1999). Word ambiguity and the optimal viewing position in reading. *Vision Research*, *39*(4), 843–857. [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(98\)00203-X](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(98)00203-X)
- Cohen, J. (2013). Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. <https://doi.org/10.4324/9780203771587>
- Cohen, L., Dehaene, S., Naccache, L., Lehéricy, S., Dehaene-Lambertz, G., Hénaff, M. A., & Michel, F. (2000). The visual word form area: Spatial and temporal characterization of an initial stage of reading in normal subjects and posterior split-brain patients. *Brain*, *123*(2), 291–307. <https://doi.org/10.1093/BRAIN/123.2.291>
- Colé, P., Bouton, S., Leuwers, C., Casalis, S., & Sprenger-Charolles, L. (2012). Stem and derivational-suffix processing during reading by French second and third graders. *Applied Psycholinguistics*, *33*(1), 97–120. <https://doi.org/10.1017/S0142716411000282>
- Colombo, L., Sulpizio, S., & Peressotti, F. (2019). The developmental trend of transposed letters effects in masked priming. *Journal of Experimental Child Psychology*, *186*, 117–130. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2019.05.007>
- 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. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.108.1.204>
- Cornell, J. M. (1985). Spontaneous mirror-writing in children. *Canadian Journal of Psychology / Revue Canadienne de Psychologie*, *39*(1), 174–179. <https://doi.org/10.1037/h0080122>
- Cosky, M. J. (1976). The role of letter recognition in word recognition. *Memory & Cognition*, *4*(2), 207–214. <https://doi.org/10.3758/BF03213165>



- Cowan, N. (1997). The development of working memory. In *The development of memory in childhood* (pp. 163–1999). Psychology Press/Erlbaum (UK) Taylor & Francis.  
<https://psycnet.apa.org/record/1997-36369-006>
- Crepaldi, D., Rastle, K., & Davis, C. J. (2010). Morphemes in their place: Evidence for position-specific identification of suffixes. *Memory & Cognition* 2010 38:3, 38(3), 312–321.  
<https://doi.org/10.3758/MC.38.3.312>
- Cunningham, A. E., & Stanovich, K. E. (1990). Assessing print exposure and orthographic processing skill in children: A quick measure of reading experience. *Journal of Educational Psychology*, 82(4), 733–740. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.82.4.733>
- Cutting, L. E., & Scarborough, H. S. (2006). Prediction of reading comprehension: Relative contributions of word recognition, language proficiency, and other cognitive skills can depend on how comprehension is measured. *Scientific Studies of Reading*, 10(3), 277–299.  
[https://doi.org/10.1207/S1532799XSSR1003\\_5](https://doi.org/10.1207/S1532799XSSR1003_5)
- Danziger, E., & Pederson, E. (1998). Through the Looking Glass. *Written Language & Literacy*, 1(2), 153–169. <https://doi.org/10.1075/wll.1.2.02dan>
- Dare, N., & Shillcock, R. (2013). Serial and parallel processing in reading: Investigating the effects of parafoveal orthographic information on nonisolated word recognition. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 66(3), 487–504.  
<https://doi.org/10.1080/17470218.2012.703212>
- Davis, C. J., & Bowers, J. S. (2006). Contrasting five different theories of letter position coding: Evidence from orthographic similarity effects. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 32(3), 535–557. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.32.3.535>

- Davis, C. J., & Lupker, S. J. (2006). Masked inhibitory priming in English: Evidence for lexical inhibition. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 32(3), 668–687. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.32.3.668>
- Davis, C. J., & Lupker, S. J. (2017). A backwards glance at words: Using reversed-interior masked primes to test models of visual word identification. *PLOS ONE*, 12(12), e0189056. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189056>
- Dawson, N., Rastle, K., & Ricketts, J. (2018). Morphological Effects in Visual Word Recognition: Children, Adolescents, and Adults. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 44(4), 645. <https://doi.org/10.1037/XLM0000485>
- Dawson, N., Rastle, K., & Ricketts, J. (2021). Finding the man amongst many: A developmental perspective on mechanisms of morphological decomposition. *Cognition*, 211, 104605. <https://doi.org/10.1016/J.COGNITION.2021.104605>
- de Heering, A., Collignon, O., & Kolinsky, R. (2018). Blind readers break mirror invariance as sighted do. *Cortex*, 101, 154–162. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2018.01.002>
- de Heering, A., & Kolinsky, R. (2019). Braille readers break mirror invariance for both visual Braille and Latin letters. *Cognition*, 189, 55–59. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2019.03.012>
- DeBaryshe, B. D. (1995). Maternal belief systems: Linchpin in the home reading process. *Journal of Applied Developmental Psychology*, 16(1), 1–20. [https://doi.org/10.1016/0193-3973\(95\)90013-6](https://doi.org/10.1016/0193-3973(95)90013-6)

- Declerck, M., Wen, Y., Snell, J., Meade, G., & Grainger, J. (2020). Unified syntax in the bilingual mind. *Psychonomic Bulletin and Review*, 27(1), 149–154. <https://doi.org/10.3758/S13423-019-01666-X>
- Dehaene, S., & Cohen, L. (2007). Cultural Recycling of Cortical Maps. *Neuron*, 56(2), 384–398. <https://doi.org/10.1016/J.NEURON.2007.10.004>
- Dehaene, S., & Cohen, L. (2011). The unique role of the visual word form area in reading. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(6), 254–262. <https://doi.org/10.1016/J.TICS.2011.04.003>
- Dehaene, S., Cohen, L., Morais, J., & Kolinsky, R. (2015). Illiterate to literate: behavioural and cerebral changes induced by reading acquisition. *Nature Reviews Neuroscience* 2015 16:4, 16(4), 234–244. <https://doi.org/10.1038/nrn3924>
- 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. <https://doi.org/10.1016/J.TICS.2005.05.004>
- Dehaene, S., Jobert, A., Naccache, L., Ciuciu, P., Poline, J. B., Bihan, D. Le, & Cohen, L. (2004). Letter binding and invariant recognition of masked words: behavioral and neuroimaging evidence. *Psychological Science*, 15(5), 307–313. <https://doi.org/10.1111/J.0956-7976.2004.00674.X>
- Dehaene, S., Nakamura, K., Jobert, A., Kuroki, C., Ogawa, S., & Cohen, L. (2010). Why do children make mirror errors in reading? Neural correlates of mirror invariance in the visual word form area. *NeuroImage*, 49(2), 1837–1848. <https://doi.org/10.1016/J.NEUROIMAGE.2009.09.024>

- Dehaene-Lambertz, G., Monzalvo, K., & Dehaene, S. (2018). The emergence of the visual word form: Longitudinal evolution of category-specific ventral visual areas during reading acquisition. *PLOS Biology*, *16*(3), e2004103. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PBIO.2004103>
- Diedenhofen Birk. (2016). *Package “cocor.”* <https://cran.r-project.org/web/packages/cocor/cocor.pdf>
- Dienes, Z. (2014). Using Bayes to get the most out of non-significant results. *Frontiers in Psychology*, *5*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00781>
- Dienes, Z. (2016). How Bayes factors change scientific practice. *Journal of Mathematical Psychology*, *72*, 78–89. <https://doi.org/10.1016/j.jmp.2015.10.003>
- Diependaele, K., Brysbaert, M., & Neri, P. (2012). How noisy is lexical decision? *Frontiers in Psychology*, *3*(SEP), 348. <https://doi.org/10.3389/FPSYG.2012.00348/BIBTEX>
- Diependaele, K., Grainger, J., & Sandra, D. (2012). Derivational Morphology and Skilled Reading. *The Cambridge Handbook of Psycholinguistics*, 311–332. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139029377.016>
- Diependaele, K., Ziegler, J. C., & Grainger, J. (2010). Fast phonology and the bimodal interactive activation model. *European Journal of Cognitive Psychology*, *22*(5), 764–778. <https://doi.org/10.1080/09541440902834782>
- Ducrot, S., & Lété, B. (2022). *Lire ou ne pas lire: Influence de la quantité d’exposition à l’écrit sur le niveau de lecture des élèves : EXPO\_LECT.*

- Dufau, S., Grainger, J., & Ziegler, J. C. (2012). How to say “No” to a nonword: A leaky competing accumulator model of lexical decision. *Journal of Experimental Psychology: Learning Memory and Cognition*, 38(4), 1117–1128. <https://doi.org/10.1037/A0026948>
- Duñabeitia, J. A., Crepaldi, D., Meyer, A. S., New, B., Pliatsikas, C., Smolka, E., & Brysbaert, M. (2018). MultiPic: A standardized set of 750 drawings with norms for six European languages. *Quarterly Journal of Experimental Psychology (2006)*, 71(4), 808–816. <https://doi.org/10.1080/17470218.2017.1310261>
- Duñabeitia, J. A., Dimitropoulou, M., Estévez, A., & Carreiras, M. (2013). The Influence of Reading Expertise in Mirror-Letter Perception: Evidence From Beginning and Expert Readers. *Mind, Brain, and Education*, 7(2), 124–135. <https://doi.org/10.1111/mbe.12017>
- Duñabeitia, J. A., Dimitropoulou, M., Grainger, J., Hernández, J. A., & Carreiras, M. (2012). Differential sensitivity of letters, numbers, and symbols to character transpositions. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 24(7), 1610–1624. [https://doi.org/10.1162/JOCN\\_A\\_00180](https://doi.org/10.1162/JOCN_A_00180)
- Duñabeitia, J. A., Lallier, M., Paz-Alonso, P. M., & Carreiras, M. (2015). The impact of literacy on position uncertainty. *Psychological Science*, 26(4), 548–550. <https://doi.org/10.1177/0956797615569890>
- Duñabeitia, J. A., Molinaro, N., & Carreiras, M. (2011). Through the looking-glass: Mirror reading. *NeuroImage*, 54(4), 3004–3009. <https://doi.org/10.1016/J.NEUROIMAGE.2010.10.079>
- Duñabeitia, J. A., Orihuela, K., & Carreiras, M. (2014). Orthographic coding in illiterates and literates. *Psychological Science*, 25(6), 1275–1280. <https://doi.org/10.1177/0956797614531026>

- Dunn, L., Thériault-Whalen, C. M., & Dunn, L. (1993). *Échelle de vocabulaire en images Peabody. Adaptation française du Peabody Picture Vocabulary Test*. Toronto: ON: Psycan.
- Ecalte, J., & Magnan, A. (2008). Relations between print exposure and literacy skills: New evidence from Grade 1-5. *British Journal of Developmental Psychology*, 26(4), 525–544. <https://doi.org/10.1348/026151007X267959>
- Ehri, L. C. (1995). Phases of development in learning to read words by sight. *Journal of Research in Reading*, 18(2), 116–125. <https://doi.org/10.1111/J.1467-9817.1995.TB00077.X>
- Eichelman, W. H. (1970). Familiarity effects in the simultaneous matching task. *Journal of Experimental Psychology*, 86(2), 275–282. <https://doi.org/10.1037/h0029959>
- Elwess, N., & Vogt, F. (2005). Heart Rate and Stress in a College Setting. *Bioscene: The Journal Of College Biology Teaching*.
- Eriksen, C. W. (1995). The flankers task and response competition: A useful tool for investigating a variety of cognitive problems. *Visual Cognition*, 2(2–3), 101–118. <https://doi.org/10.1080/13506289508401726>
- Evans, M. A., & Shaw, D. (2008). Home grown for reading: Parental contributions to young children's emergent literacy and word recognition. *Canadian Psychology*, 49(2), 89–95. <https://doi.org/10.1037/0708-5591.49.2.89>
- Farioli, F., Grainger, J., & Ferrand, L. (2011). PHOM: Une base de données de 14 000 pseudo-homophones. *Année Psychologique*, 111(4), 725–751. <https://doi.org/10.4074/S0003503311004052>

- Fernandes, T., Coelho, B., Lima, F., & Castro, S. L. (2018). The handle of literacy: evidence from preliterate children and illiterate adults on orientation discrimination of graspable and non-graspable objects. *Language, Cognition and Neuroscience*, 33(3), 278–292. <https://doi.org/10.1080/23273798.2017.1283424>
- Fernandes, T., Leite, I., & Kolinsky, R. (2016). Into the Looking Glass: Literacy Acquisition and Mirror Invariance in Preschool and First-Grade Children. *Child Development*, 87(6), 2008–2025. <https://doi.org/10.1111/cdev.12550>
- Fernández-López, M., Davis, C. J., Perea, M., Marcet, A., & Gómez, P. (2022). Unveiling the boost in the sandwich priming technique. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 75(7), 1382–1393. <https://doi.org/10.1177/17470218211055097>
- Fernández-López, M., Gómez, P., & Perea, M. (2021). Which Factors Modulate Letter Position Coding in Pre-literate Children? *Frontiers in Psychology*, 12, 3319. <https://doi.org/10.3389/FPSYG.2021.708274/BIBTEX>
- Fernández-López, M., Marcet, A., & Perea, M. (2019). Can response congruency effects be obtained in masked priming lexical decision? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 45(9), 1683–1702. <https://doi.org/10.1037/xlm0000666>
- Fernández-López, M., Marcet, A., & Perea, M. (2021). Does orthographic processing emerge rapidly after learning a new script? *British Journal of Psychology*, 112(1), 52–91. <https://doi.org/10.1111/BJOP.12469>
- Ferrand, L., New, B., Brysbaert, M., Keuleers, E., Bonin, P., Méot, A., Augustinova, M., & Pallier, C. (2010). The French Lexicon Project: Lexical decision data for 38,840 French

- words and 38,840 pseudowords. *Behavior Research Methods*, 42(2), 488–496.  
<https://doi.org/10.3758/BRM.42.2.488>
- Ferrer, E., Shaywitz, B. A., Holahan, J. M., Marchione, K., & Shaywitz, S. E. (2009).  
Uncoupling of Reading and IQ Over Time. *Psychological Science*, 21(1), 93–101.  
<https://doi.org/10.1177/0956797609354084>
- Finger, H., Goeke, C., Diekamp, D., Standvoß, K., & König, P. (2017). LabVanced: A Unified  
JavaScript Framework for Online Studies. *Computational Social Science IC*, 2(2).  
<https://doi.org/10.1126/science.aac4716>
- Forster, K. I., & Chambers, S. M. (1973). Lexical access and naming time. *Journal of Verbal  
Learning and Verbal Behavior*, 12(6), 627–635. [https://doi.org/10.1016/S0022-5371\(73\)80042-8](https://doi.org/10.1016/S0022-5371(73)80042-8)
- 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. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.10.4.680>
- Forster, K. I., & Forster, J. C. (2003). DMDX: A Windows display program with millisecond  
accuracy. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 35(1), 116–124.  
<https://doi.org/10.3758/BF03195503>
- Frank, M., & Harrell, E. (2022). *Package “Hmisc.”* <https://hbiostat.org/R/Hmisc/>
- Frankish, C., & Turner, E. (2007). SIHGT and SUNOD: The role of orthography and phonology  
in the perception of transposed letter anagrams. *Journal of Memory and Language*, 56(2),  
189–211. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2006.11.002>



- Frith, U. (1985). Beneath the surface of developmental dyslexia. . In K. Patterson, J. C. Marshall, & M. Coltheart (Eds.), *Surface dyslexia – Neuropsychological and cognitive studies or phonological reading* (pp. 301–330). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Frost, R., Katz, L., & Bentin, S. (1987). Strategies for visual word recognition and orthographical depth: A multilingual comparison. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *13*(1), 104–115. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.13.1.104>
- García-Orza, J., Pera, M., & Muñoz, S. (2010). Are transposition effects specific to letters? *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *63*(8), 1603–1618. <https://doi.org/10.1080/17470210903474278>
- Gayán, J., & Olson, R. K. (2003). Genetic and environmental influences on individual differences in printed word recognition. *Journal of Experimental Child Psychology*, *84*(2), 97–123. [https://doi.org/10.1016/S0022-0965\(02\)00181-9](https://doi.org/10.1016/S0022-0965(02)00181-9)
- Gil-López, C., Perea, M., Moret-Tatay, C., & Carreiras, M. (2011). Can masked priming effects be obtained with handwritten words? *Attention, Perception, and Psychophysics*, *73*(6), 1643–1649. <https://doi.org/10.3758/S13414-011-0174-Y/TABLES/2>
- Gomez, P., Marcet, A., & Perea, M. (2021). Are better young readers more likely to confuse their mother with their mother? *Quarterly Journal of Experimental Psychology (2006)*, *74*(9), 1542–1552. <https://doi.org/10.1177/17470218211012960>
- Gomez, P., Ratcliff, R., & Perea, M. (2008). The overlap model: A model of letter position coding. *Psychological Review*, *115*(3), 577–600. <https://doi.org/10.1037/a0012667>

- Goodrich B, Gabry J, Ali I, & Brilleman S. (2020). *rstanarm: Bayesian applied regression modeling via Stan*. (R package version 2.21.1).
- Goodwin, L. D., & Leech, N. L. (2006). Understanding Correlation: Factors That Affect the Size of *r*. *The Journal of Experimental Education*, 74(3), 249–266. <https://doi.org/10.3200/JEXE.74.3.249-266>
- Goswami, U. (2000). Phonological representations, reading development and dyslexia: towards a cross-linguistic theoretical framework. *Dyslexia*, 6(2), 133–151. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0909\(200004/06\)6:2<133::AID-DYS160>3.0.CO;2-A](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0909(200004/06)6:2<133::AID-DYS160>3.0.CO;2-A)
- Goswami, U., Ziegler, J. C., Dalton, L., & Schneider, W. (2001). Pseudohomophone effects and phonological recoding procedures in reading development in English and German. *Journal of Memory and Language*, 45(4), 648–664. <https://doi.org/10.1006/JMLA.2001.2790>
- Gough, P. B., & Tunmer, W. E. (1986). Decoding, Reading, and Reading Disability. *Remedial and Special Education*, 7(1), 6–10. <https://doi.org/10.1177/074193258600700104>
- Grainger, J. (1990). Word frequency and neighborhood frequency effects in lexical decision and naming. *Journal of Memory and Language*, 29(2), 228–244. [https://doi.org/10.1016/0749-596X\(90\)90074-A](https://doi.org/10.1016/0749-596X(90)90074-A)
- Grainger, J. (2008). Cracking the orthographic code: An introduction. *Language and Cognitive Processes*, 23(1), 1–35. <https://doi.org/10.1080/01690960701578013>

- Grainger, J. (2018). Orthographic processing: A “mid-level” vision of reading: The 44th Sir Frederic Bartlett Lecture. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* (2006), 71(2), 335–359. <https://doi.org/10.1080/17470218.2017.1314515>
- Grainger, J., Bertrand, D., Lété, B., Beyersmann, E., & Ziegler, J. C. (2016). A developmental investigation of the first-letter advantage. *Journal of Experimental Child Psychology*, 152, 161–172. <https://doi.org/10.1016/J.JECP.2016.07.016>
- Grainger, J., Dufau, S., Montant, M., Ziegler, J. C., & Fagot, J. (2012). Orthographic Processing in Baboons (*Papio papio*). *Science*, 336(6078), 245–248. <https://doi.org/10.1126/science.1218152>
- Grainger, J., Dufau, S., & Ziegler, J. C. (2016). A Vision of Reading. *Trends in Cognitive Sciences*, 20(3), 171–179. <https://doi.org/10.1016/J.TICS.2015.12.008>
- Grainger, J., & Ferrand, L. (1994). Phonology and Orthography in Visual Word Recognition: Effects of Masked Homophone Primes. *Journal of Memory and Language*, 33(2), 218–233. <https://doi.org/10.1006/JMLA.1994.1011>
- 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(4), 865–884. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.32.4.865>
- Grainger, J., & Hannagan, T. (2014). What is special about orthographic processing? *Written Language & Literacy*, 17(2), 225–252. <https://doi.org/10.1075/WLL.17.2.03GRA>

- Grainger, J., & Holcomb, P. J. (2009). Watching the Word Go by: On the Time-course of Component Processes in Visual Word Recognition. *Language and Linguistics Compass*, 3(1), 128. <https://doi.org/10.1111/J.1749-818X.2008.00121.X>
- Grainger, J., & Jacobs, A. M. (1993). Masked partial-word priming in visual word recognition: Effects of positional letter frequency. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 19(5), 951–964. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.19.5.951>
- Grainger, J., & Jacobs, A. M. (1996). Orthographic processing in visual word recognition: a multiple read-out model. *Psychological Review*, 103(3), 518–565. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.103.3.518>
- Grainger, J., Lété, B., Bertand, D., Dufau, S., & Ziegler, J. C. (2012). Evidence for multiple routes in learning to read. *Cognition*, 123(2), 280–292. <https://doi.org/10.1016/J.COGNITION.2012.01.003>
- Grainger, J., Mathôt, S., & Vitu, F. (2014). Tests of a model of multi-word reading: Effects of parafoveal flanking letters on foveal word recognition. *Acta Psychologica*, 146(1), 35–40. <https://doi.org/10.1016/J.ACTPSY.2013.11.014>
- Grainger, J., Rey, A., & Dufau, S. (2008). Letter perception: from pixels to pandemonium. *Trends in Cognitive Sciences*, 12(10), 381–387. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2008.06.006>
- Grainger, J., Snell, J., & Beyersmann, E. (2021). Morphological processing in the flankers task. *Language, Cognition and Neuroscience*, 36(3), 288–295. [https://doi.org/10.1080/23273798.2020.1810292/SUPPL\\_FILE/PLCP\\_A\\_1810292\\_SM4594.DOCX](https://doi.org/10.1080/23273798.2020.1810292/SUPPL_FILE/PLCP_A_1810292_SM4594.DOCX)

- Grainger, J., Tydgat, I., & Isselé, J. (2010). Crowding affects letters and symbols differently. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 36(3), 673–688. <https://doi.org/10.1037/A0016888>
- Grainger, J., & van Heuven, W. (2003). Modeling letter position coding in printed word perception. In P. Bonin (Ed.), *The Mental Lexicon* (pp. 1–24). New York: Nova Science Publishers.
- Grainger, J., & Whitney, C. (2004). Does the human mind read words as a whole? *Trends in Cognitive Sciences*, 8(2), 58–59. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2003.11.006>
- Grainger, J., & Ziegler, J. C. (2011). A dual-route approach to orthographic processing. *Frontiers in Psychology*, 2(APR), 54. <https://doi.org/10.3389/FPSYG.2011.00054/BIBTEX>
- Guerrera, C., & Forster, K. (2008). Masked form priming with extreme transposition. *Language and Cognitive Processes*, 23(1), 117–142. <https://doi.org/10.1080/01690960701579722>
- Gutiérrez-Sigut, E., Marcet, A., & Perea, M. (2019). Tracking the time course of letter visual-similarity effects during word recognition: A masked priming ERP investigation. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 19(4), 966–984. <https://doi.org/10.3758/s13415-019-00696-1>
- Habib, M., & Joly-Pottuz, B. (2008). Dyslexie, du diagnostic à la thérapeutique: Un état des lieux. *Revue de Neuropsychologie*, 18(4), 247–325. <https://psycnet.apa.org/record/2009-20138-001>
- 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.

<https://doi.org/10.1016/j.jecp.2008.04.002>

Haikiö, T., & Vainio, S. (2018). Syllables and inflectional morphemes in early Finnish readers: evidence from eye-movements. *Journal of Child Language*, 45(5), 1227–1245.

<https://doi.org/10.1017/S0305000918000132>

Hannagan, T., Amedi, A., Cohen, L., Dehaene-Lambertz, G., & Dehaene, S. (2015). Origins of the specialization for letters and numbers in ventral occipitotemporal cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, 19(7), 374–382. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2015.05.006>

Hannagan, T., Ktori, M., Chanceaux, M., & Grainger, J. (2012). Deciphering CAPTCHAs: What a Turing Test Reveals about Human Cognition. *PLOS ONE*, 7(3), e32121.

<https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0032121>

Harm, M. W., & Seidenberg, M. S. (1999). Phonology, reading acquisition, and dyslexia: insights from connectionist models. *Psychological Review*, 106(3), 491–528.

<https://doi.org/10.1037/0033-295X.106.3.491>

Harm, M. W., & Seidenberg, M. S. (2004). Computing the meanings of words in reading: cooperative division of labor between visual and phonological processes. *Psychological Review*, 111(3), 662–720. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.111.3.662>

<https://doi.org/10.1037/0033-295X.111.3.662>

Hartigan, J. A., & Wong, M. A. (1979). Algorithm AS 136: A K-Means Clustering Algorithm.

*Applied Statistics*, 28(1), 100. <https://doi.org/10.2307/2346830>

Hasenäcker, J., Beyersmann, E., & Schroeder, S. (2016). Masked morphological priming in German-speaking adults and children: Evidence from response time distributions.

<https://doi.org/10.3389/FPSYG.2016.00929/BIBTEX>

Hasenäcker, J., Beyersmann, E., & Schroeder, S. (2020). Morphological Priming in Children: Disentangling the Effects of School-grade and Reading Skill. *Scientific Studies of Reading*, 24(6), 484–499. <https://doi.org/10.1080/10888438.2020.1729768>

Hasenäcker, J., & Schroeder, S. (2017). Syllables and morphemes in German reading development: Evidence from second graders, fourth graders, and adults. *Applied Psycholinguistics*, 38(3), 733–753. <https://doi.org/10.1017/S0142716416000412>

Hasenäcker, J., & Schroeder, S. (2022). Transposed and Substituted Letter Effects Across Reading Development: A Longitudinal Study. *Journal of Experimental Psychology: Learning Memory and Cognition*, 48(8), 1202–1218. <https://doi.org/10.1037/XLM0001064>

Hasenäcker, J., Schröter, P., & Schroeder, S. (2017). Investigating developmental trajectories of morphemes as reading units in German. *Journal of Experimental Psychology: Learning Memory and Cognition*, 43(7), 1093–1108. <https://doi.org/10.1037/XLM0000353>

Hautala, J., & Loberg, O. (2015). Breaking down the word length effect on readers' eye movements. *Language, Cognition and Neuroscience*, 30(8), 993–1007. <https://doi.org/10.1080/23273798.2015.1049187>

Hayenga, A. O., & Corpus, J. H. (2010). Profiles of intrinsic and extrinsic motivations: A person-centered approach to motivation and achievement in middle school. *Motivation and Emotion*, 34(4), 371–383. <https://doi.org/10.1007/s11031-010-9181-x>

- Hennig. (2010). *Fpc: Flexible procedures for clustering* (2.2). <https://CRAN.R-project.org/package=fpc>
- Hennig, C. (2007). Cluster-wise assessment of cluster stability. *Computational Statistics & Data Analysis*, 52(1), 258–271. <https://doi.org/10.1016/j.csda.2006.11.025>
- Holcomb, P. J., & Grainger, J. (2006). On the Time Course of Visual Word Recognition: An Event-related Potential Investigation using Masked Repetition Priming. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18(10), 1631. <https://doi.org/10.1162/JOCN.2006.18.10.1631>
- Howes, D. H., & Solomon, R. L. (1951). Visual duration threshold as a function of word-probability. *Journal of Experimental Psychology*, 41(6), 401–410. <https://doi.org/10.1037/h0056020>
- Huey, E. B. (1908). *The Psychology and Pedagogy of Reading*. Macmillan. <https://psycnet.apa.org/record/1908-10406-000>
- Hulme, C., & Snowling, M. J. (2013). Learning to Read: What We Know and What We Need to Understand Better. *Child Development Perspectives*, 7(1), 1–5. <https://doi.org/10.1111/cdep.12005>
- Insee. (n.d.). *Taux de scolarisation par âge*. Retrieved May 4, 2023, from <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2383587>
- Jacobs, A. M., & Grainger, J. (1991). Automatic letter priming in an alphabetic decision task. *Perception & Psychophysics*, 49(1), 43–52. <https://doi.org/10.3758/BF03211615>
- Jacobs, A. M., & Grainger, J. (1994). Models of Visual Word Recognition-Sampling the State of the Art. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20(6), 1311–1334. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.20.6.1311>



- Jacobs, A. M., Grainger, J., & Ferrand, L. (1995). The incremental priming technique: A method for determining within-condition priming effects. *Perception & Psychophysics*, 57(8), 1101–1110. <https://doi.org/10.3758/BF03208367/METRICS>
- Johnson, R. L., Perea, M., & Rayner, K. (2007). Transposed-letter effects in reading: Evidence from eye movements and parafoveal preview. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 33(1), 209–229. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.33.1.209>
- Katz, L., Brancazio, L., Irwin, J., Katz, S., Magnuson, J., & Whalen, D. H. (2012). What lexical decision and naming tell us about reading. *Reading and Writing*, 25(6), 1259–1282. <https://doi.org/10.1007/s11145-011-9316-9>
- Kelly, A. N., van Heuven, W. J. B., Pitchford, N. J., & Ledgeway, T. (2013). Is the Masked Priming Same-Different Task a Pure Measure of Prelexical Processing? *PLoS ONE*, 8(9), e72888. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0072888>
- Keuleers, E. (2013). *vwr: Useful functions for visual word recognition research* (0.3.0).
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2015.05.002>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2016.12.005>

- Kinoshita, S., & Norris, D. (2009). Transposed-letter priming of prelexical orthographic representations. *Journal of Experimental Psychology. Learning, Memory, and Cognition*, 35(1), 1–18. <https://doi.org/10.1037/A0014277>
- Kinoshita, S., & Norris, D. (2012). Task-Dependent Masked Priming Effects in Visual Word Recognition. *Frontiers in Psychology*, 3. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00178>
- Kinoshita, S., & Norris, D. (2013). Letter order is not coded by open bigrams. *Journal of Memory and Language*, 69(2), 135. <https://doi.org/10.1016/J.JML.2013.03.003>
- Kintsch, W., & Rawson, K. A. (2008). Comprehension. *The Science of Reading: A Handbook*, 211–226. <https://doi.org/10.1002/9780470757642.CH12>
- Kolinsky, R., & Fernandes, T. (2014). A cultural side effect: learning to read interferes with identity processing of familiar objects. *Frontiers in Psychology*, 5. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01224>
- Krueger, L. E. (1978). A theory of perceptual matching. *Psychological Review*, 85(4), 278–304. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.85.4.278>
- Ktori, M., Grainger, J., Dufau, S., & Holcomb, P. J. (2012). The “electrophysiological sandwich”: A method for amplifying ERP priming effects. *Psychophysiology*, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2012.01387.x>
- Ktori, M., Kingma, B., Hannagan, T., Holcomb, P. J., & Grainger, J. (2014). On the time-course of adjacent and non-adjacent transposed-letter priming. *Journal of Cognitive Psychology*, 26(5), 491–505. <https://doi.org/10.1080/20445911.2014.922092>
- Landerl, K., Freudenthaler, H. H., Heene, M., De Jong, P. F., Desrochers, A., Manolitsis, G., Parrila, R., & Georgiou, G. K. (2019). Phonological Awareness and Rapid Automated

- Naming as Longitudinal Predictors of Reading in Five Alphabetic Orthographies with Varying Degrees of Consistency. *Scientific Studies of Reading*, 23(3), 220–234. <https://doi.org/10.1080/10888438.2018.1510936>
- Lefavrais, P. (2005). *L'Alouette-R*. Centre de psychologie appliquée.
- Lefevre, E., Leloup, G., Berthès, H., Brossette, B., & Cavalli, E. (2021). Profils déficitaires et procédure de dépistage chez les adolescents francophones présentant une dyslexie développementale. *Pprouche Neuropsychologique Des Apprentissages Chez l'Enfant*, 175, 650–662.
- Lemhöfer, K., & Broersma, M. (2011). Introducing LexTALE: A quick and valid Lexical Test for Advanced Learners of English. *Behavior Research Methods* 2011 44:2, 44(2), 325–343. <https://doi.org/10.3758/S13428-011-0146-0>
- Lenth, R. (2023). *emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means* (R package version 1.8.4-1).
- 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(1), 47–62. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2012.09.001>
- Lété, B., Sprenger-Charolles, L., & Colé, P. (2004). MANULEX: a grade-level lexical database from French elementary school readers. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers: A Journal of the Psychonomic Society, Inc*, 36(1), 156–166. <https://doi.org/10.3758/BF03195560>
- Levi, D. M. (2008). Crowding-An essential bottleneck for object recognition: A mini-review. *Vision Research*, 48(5), 635–654. <https://doi.org/10.1016/J.VISRES.2007.12.009>

- Logan, G. D. (1996). The CODE theory of visual attention: An integration of space-based and object-based attention. *Psychological Review*, 103(4), 603–649.  
<https://doi.org/10.1037/0033-295X.103.4.603>
- Lubineau, M., Dehaene, S., Potier-Watkins, C., Sprenger-Charolles, L., & Ziegler, J. (2021). *Note du Conseil scientifique de l'éducation nationale : Évaluer la lecture en 6ème.*
- Luce, R. D. (1986). *Response times : their role in inferring elementary mental organization.* Oxford University Press.
- Lupker, S. J., & Davis, C. J. (2009). Sandwich priming: A method for overcoming the limitations of masked priming by reducing lexical competitor effects. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 35(3), 618–639.  
<https://doi.org/10.1037/a0015278>
- Lupker, S. J., Perea, M., & Davis, C. J. (2008). Transposed-letter effects: Consonants, vowels and letter frequency. *Language and Cognitive Processes*, 23(1), 93–116.  
<https://doi.org/10.1080/01690960701579714>
- Lupker, S. J., Spinelli, G., & Davis, C. J. (2020). Is zjudge a better prime for JUDGE than zudge is?: A new evaluation of current orthographic coding models. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 46(11), 1252–1266.  
<https://doi.org/10.1037/xhp0000856>
- Madec, S., Rey, A., Dufau, S., Klein, M., & Grainger, J. (2012). The time course of visual letter perception. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 24(7), 1645–1655.  
[https://doi.org/10.1162/JOCN\\_A\\_00178](https://doi.org/10.1162/JOCN_A_00178)

- Makowski, D., Ben-Shachar, M., & Lüdtke, D. (2019). bayestestR: Describing Effects and their Uncertainty, Existence and Significance within the Bayesian Framework. *Journal of Open Source Software*, 4(40), 1541. <https://doi.org/10.21105/joss.01541>
- Manzi, V., D'Ottavio, S., Impellizzeri, F. M., Chaouachi, A., Chamari, K., & Castagna, C. (2010). Profile of Weekly Training Load in Elite Male Professional Basketball Players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(5), 1399–1406. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181d7552a>
- Marcet, A., & Perea, M. (2017). Is nevtral NEUTRAL? Visual similarity effects in the early phases of written-word recognition. *Psychonomic Bulletin & Review*, 24(4), 1180–1185. <https://doi.org/10.3758/s13423-016-1180-9>
- Martin, J., Frauenfelder, U. H., & Colé, P. (2012). Morphological awareness in dyslexic university students. *Applied Psycholinguistics*, 35(6), 1213–1233. <https://doi.org/10.1017/S0142716413000167>
- Marzouki, Y., & Grainger, J. (2014). Effects of stimulus duration and inter-letter spacing on letter-in-string identification. *Acta Psychologica*, 148, 49–55. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2013.12.011>
- Massol, S., Duñabeitia, J. A., Carreiras, M., & Grainger, J. (2013). Evidence for Letter-Specific Position Coding Mechanisms. *PLoS ONE*, 8(7), e68460. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0068460>
- Massol, S., & Grainger, J. (2021). The sentence superiority effect in young readers. *Developmental Science*, 24(2). <https://doi.org/10.1111/DESC.13033>

- Massol, S., Grainger, J., Dufau, S., & Holcomb, P. (2010). Masked priming from orthographic neighbors: An ERP investigation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *36*(1), 162–174. <https://doi.org/10.1037/a0017614>
- Mathewson, G. C. (1994). Model of attitude influence upon reading and learning to read. In R.B. Ruddell, M.R. Ruddell & H. Singer (Eds.), *Theoretical models and processes of reading*. . In R. B. Ruddell, M. R. Ruddel, & H. Singer (Eds.), *Theoretical models and processes of reading*. (pp. 1131–1161). Newark, DE: International Reading Association. <http://www.sciepub.com/reference/285502>
- Mathôt, S., Schreij, D., & Theeuwes, J. (2012). OpenSesame: an open-source, graphical experiment builder for the social sciences. *Behavior Research Methods*, *44*(2), 314–324. <https://doi.org/10.3758/S13428-011-0168-7>
- Maurer, U., Brem, S., Bucher, K., & Brandeis, D. (2005). Emerging neurophysiological specialization for letter strings. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *17*(10), 1532–1552. <https://doi.org/10.1162/089892905774597218>
- Maurer, U., Brem, S., Kranz, F., Bucher, K., Benz, R., Halder, P., Steinhausen, H. C., & Brandeis, D. (2006). Coarse neural tuning for print peaks when children learn to read. *NeuroImage*, *33*(2), 749–758. <https://doi.org/10.1016/J.NEUROIMAGE.2006.06.025>
- McClelland, J. L., & Rumelhart, D. E. (1981). An interactive activation model of context effects in letter perception: I. An account of basic findings. *Psychological Review*, *88*(5), 375–407. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.88.5.375>
- McConkie, G. W., & Rayner, K. (1975). The span of the effective stimulus during a fixation in reading. *Perception & Psychophysics*, *17*(6), 578–586. <https://doi.org/10.3758/BF03203972>

- 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.
- McGinnies, E., Comer, P. B., & Lacey, O. L. (1952). Visual-recognition thresholds as a function of word length and word frequency. *Journal of Experimental Psychology*, *44*(2), 65–69. <https://doi.org/10.1037/h0063142>
- Meyer, D. E., & Schvaneveldt, R. W. (1971). Facilitation in recognizing pairs of words: Evidence of a dependence between retrieval operations. *Journal of Experimental Psychology*, *90*(2), 227–234. <https://doi.org/10.1037/h0031564>
- Michel, J.-B., Shen, Y. K., Aiden, A. P., Veres, A., Gray, M. K., Pickett, J. P., Hoiberg, D., Clancy, D., Norvig, P., Orwant, J., Pinker, S., Nowak, M. A., & Aiden, E. L. (2011). Quantitative Analysis of Culture Using Millions of Digitized Books. *Science*, *331*(6014), 176–182. <https://doi.org/10.1126/science.1199644>
- Mirault, J. (2021). L'attention et l'inattention en classe : approche synchrone multimodale et comportementale et physiologique. *Journée Scientifique SFERE*.
- Mirault, J., & Grainger, J. (2020). On the time it takes to judge grammaticality. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* (2006), *73*(9), 1460–1465. <https://doi.org/10.1177/1747021820913296>
- Mirault, J., Leflaëc, C., & Grainger, J. (2022). Orthographic relatedness and transposed-word effects in the grammatical decision task. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *84*(3), 1043–1051. <https://doi.org/10.3758/s13414-021-02421-y>

- Mirault, J., Snell, J., & Grainger, J. (2018). You That Read Wrong Again! A Transposed-Word Effect in Grammaticality Judgments. *Psychological Science*, *29*(12), 1922–1929. <https://doi.org/10.1177/0956797618806296>
- 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), 267–296. <https://doi.org/10.1037/a0021890>
- Molinaro, N., Duñabeitia, J. A., Marin-Gutiérrez, A., & Carreiras, M. (2010). From numbers to letters: Feedback regularization in visual word recognition. *Neuropsychologia*, *48*(5), 1343–1355. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.12.037>
- Monzalvo, K. (2011). *Etude chez l'enfant normal et dyslexique de l'impact sur les réseaux corticaux visuel et linguistique d'une activité culturelle la lecture*. Paris 6.
- Mousikou, P., Beyersmann, E., Ktori, M., Javourey-Drevet, L., Crepaldi, D., Ziegler, J. C., Grainger, J., & Schroeder, S. (2020). Orthographic consistency influences morphological processing in reading aloud: Evidence from a cross-linguistic study. *Developmental Science*, *23*(6). <https://doi.org/10.1111/DESC.12952>
- Munafò, M. R., Nosek, B. A., Bishop, D. V. M., Button, K. S., Chambers, C. D., Percie du Sert, N., Simonsohn, U., Wagenmakers, E.-J., Ware, J. J., & Ioannidis, J. P. A. (2017). A manifesto for reproducible science. *Nature Human Behaviour*, *1*(1), 0021. <https://doi.org/10.1038/s41562-016-0021>
- Muter, V., Hulme, C., Snowling, M. J., & Stevenson, J. (2004). Phonemes, Rimes, Vocabulary, and Grammatical Skills as Foundations of Early Reading Development: Evidence From a Longitudinal Study. *Developmental Psychology*, *40*(5), 665–681. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.40.5.665>



- New, B., & Grainger, J. (2011). On letter frequency effects. *Acta Psychologica*, *138*(2), 322–328. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2011.07.001>
- Norris, D. (2006). The Bayesian reader: Explaining word recognition as an optimal Bayesian decision process. *Psychological Review*, *113*(2), 327–357. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.113.2.327>
- Norris, D., & Kinoshita, S. (2008). Perception as evidence accumulation and Bayesian inference: Insights from masked priming. *Journal of Experimental Psychology: General*, *137*(3), 434–455. <https://doi.org/10.1037/a0012799>
- Pederson, E. (2003). Mirror-image discrimination among nonliterate, monoliterate, and biliterate Tamil subjects. *Written Language & Literacy*, *6*(1), 71–91. <https://doi.org/10.1075/wll.6.1.04ped>
- Pegado, F., Nakamura, K., Braga, L. W., Ventura, P., Nunes Filho, G., Pallier, C., Jobert, A., Morais, J., Cohen, L., Kolinsky, R., & Dehaene, S. (2014). Literacy breaks mirror invariance for visual stimuli: A behavioral study with adult illiterates. *Journal of Experimental Psychology: General*, *143*(2), 887–894. <https://doi.org/10.1037/a0033198>
- Pegado, F., Nakamura, K., Cohen, L., & Dehaene, S. (2011). Breaking the symmetry: Mirror discrimination for single letters but not for pictures in the Visual Word Form Area. *NeuroImage*, *55*(2), 742–749. <https://doi.org/10.1016/J.NEUROIMAGE.2010.11.043>
- Pelli, D. G., Palomares, M., & Majaj, N. J. (2004). Crowding is unlike ordinary masking: Distinguishing feature integration from detection. *Journal of Vision*, *4*(12), 12–12. <https://doi.org/10.1167/4.12.12>

- Pelli, D. G., & Tillman, K. A. (2008). The uncrowded window of object recognition. *Nature Neuroscience*, *11*(10), 1129–1135. <https://doi.org/10.1038/NN.2187>
- Perea, M., & Carreiras, M. (2003). Sequential effects in the lexical decision task: The role of the item frequency of the previous trial. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology: Section A*, *56*(3), 385–401. <https://doi.org/10.1080/02724980244000387>
- Perea, M., Duñabeitia, J. A., & Carreiras, M. (2008). Transposed-Letter Priming Effects for Close Versus Distant Transpositions. *Experimental Psychology*, *55*(6), 384–393. <https://doi.org/10.1027/1618-3169.55.6.384>
- Perea, M., Jiménez, M., & Gomez, P. (2016). Does location uncertainty in letter position coding emerge because of literacy training? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *42*(6), 996–1001. <https://doi.org/10.1037/XLM0000208>
- Perea, M., & Lupker, S. J. (2003). Transposed-letter confusability effects in masked form priming. In *Masked priming: The state of the art*. (pp. 97–120). Psychology Press.
- 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. <https://doi.org/10.1016/J.JML.2004.05.005>
- Perea, M., Moret-Tatay, C., & Panadero, V. (2011). Suppression of mirror generalization for reversible letters: Evidence from masked priming. *Journal of Memory and Language*, *65*(3), 237–246. <https://doi.org/10.1016/J.JML.2011.04.005>
- Perea, M., Rosa, E., & Gómez, C. (2005). The frequency effect for pseudowords in the lexical decision task. *Perception & Psychophysics*, *67*(2), 301–314. <https://doi.org/10.3758/BF03206493>

- Perea, M., Winkler, H., Mallouh, R. A., Barnes, L., & Gomez, P. (2015). In Defense of Position Uncertainty: A Reply to Duñabeitia, Orihuela, and Carreiras (2014). *Psychological Science*, 26(4), 545–547. [https://doi.org/10.1177/0956797614566468/ASSET/0956797614566468.FP.PNG\\_V03](https://doi.org/10.1177/0956797614566468/ASSET/0956797614566468.FP.PNG_V03)
- Perfetti, C. A. (2017). Lexical quality revisited. *Developmental Perspectives in Written Language and Literacy*, 51–67. <https://doi.org/10.1075/Z.206.04PER>
- Perfetti, C. A., & Hart, L. (2002). The lexical quality hypothesis. In *Precursors of Functional Literacy* (pp. 189–213). <https://doi.org/10.1075/SWLL.11.14PER>
- 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(2), 273–315. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.114.2.273>
- Perry, C., Ziegler, J. C., & Zorzi, M. (2010). Beyond single syllables: large-scale modeling of reading aloud with the Connectionist Dual Process (CDP++) model. *Cognitive Psychology*, 61(2), 106–151. <https://doi.org/10.1016/J.COGLING.2010.04.001>
- Petit, J. P., Midgley, K. J., Holcomb, P. J., & Grainger, J. (2006). On the time course of letter perception: A masked priming ERP investigation. *Psychonomic Bulletin & Review*, 13(4), 674. <https://doi.org/10.3758/BF03193980>
- Petscher, Y. (2010). A meta-analysis of the relationship between student attitudes towards reading and achievement in reading. *Journal of Research in Reading*, 33(4), 335–355. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9817.2009.01418.x>

- Pitchford, N. J., Ledgeway, T., & Masterson, J. (2008). Effect of orthographic processes on letter position encoding. *Journal of Research in Reading*, 31(1), 97–116. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9817.2007.00363.x>
- Posner, M. I., & Mitchell, R. F. (1967). Chronometric analysis of classification. *Psychological Review*, 74(5), 392–409. <https://doi.org/10.1037/H0024913>
- Pour enseigner le vocabulaire à l'école maternelle - guide vert.* (2023).
- Quémart, P., Casalis, S., & Duncan, L. G. (2012). Exploring the Role of Bases and Suffixes When Reading Familiar and Unfamiliar Words: Evidence From French Young Readers. *Scientific Studies of Reading*, 16(5), 424–442. <https://doi.org/10.1080/10888438.2011.584333>
- R Core Team. (2020). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.r-project.org/index.html>
- Rastle, K. (2019). The place of morphology in learning to read in English. *Cortex*, 116, 45–54. <https://doi.org/10.1016/J.CORTEX.2018.02.008>
- Rastle, K., Davis, M. H., Marslen-Wilson, W. D., & Tyler, L. K. (2000). Morphological and semantic effects in visual word recognition: A time-course study. *Language and Cognitive Processes*, 15(4–5), 507–537. <https://doi.org/10.1080/01690960050119689>
- Ratcliff, R. (1981). A theory of order relations in perceptual matching. *Psychological Review*, 88(6), 552–572. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.88.6.552>
- Raviv, T., Kessenich, M., & Morrison, F. J. (2004). A mediational model of the association between socioeconomic status and three-year-old language abilities: the role of parenting

- factors. *Early Childhood Research Quarterly*, 19(4), 528–547.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2004.10.007>
- Rayner, K. (1975). The perceptual span and peripheral cues in reading. *Cognitive Psychology*, 7(1), 65–81. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(75\)90005-5](https://doi.org/10.1016/0010-0285(75)90005-5)
- Rayner, K. (1986). Eye movements and the perceptual span in beginning and skilled readers. *Journal of Experimental Child Psychology*, 41(2), 211–236. [https://doi.org/10.1016/0022-0965\(86\)90037-8](https://doi.org/10.1016/0022-0965(86)90037-8)
- Rayner, K. (1998). Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. *Psychological Bulletin*, 124(3), 372–422. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.124.3.372>
- Rayner, K., White, S. J., Johnson, R. L., & Liversedge, S. P. (2006). Reading Words With Jumbled Letters. *Psychological Science*, 17(3), 192–193. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2006.01684.x>
- Reicher, G. M. (1969). Perceptual recognition as a function of meaningfulness of stimulus material. *Journal of Experimental Psychology*, 81(2), 275–280.  
<https://doi.org/10.1037/H0027768>
- Reichle, E. D., Liversedge, S. P., Pollatsek, A., & Rayner, K. (2009). Encoding multiple words simultaneously in reading is implausible. *Trends in Cognitive Sciences*, 13(3), 115–119.  
<https://doi.org/10.1016/J.TICS.2008.12.002>
- Reichle, E. D., Pollatsek, A., Fisher, D. L., & Rayner, K. (1998). Toward a model of eye movement control in reading. *Psychological Review*, 105(1), 125–157.  
<https://doi.org/10.1037/0033-295X.105.1.125>

- Reichle, E. D., Rayner, K., & Pollatsek, A. (1999). Eye movement control in reading: accounting for initial fixation locations and refixations within the E-Z Reader model. *Vision Research*, 39(26), 4403–4411. [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(99\)00152-2](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(99)00152-2)
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.cogsys.2005.07.006>
- Riesenhuber, M., & Poggio, T. (1999). Hierarchical models of object recognition in cortex. *Nature Neuroscience*, 2(11), 1019–1025. <https://doi.org/10.1038/14819>
- Rosengrant, D., Herrington, D., & O'Brien, J. (2021). Investigating Student Sustained Attention in a Guided Inquiry Lecture Course Using an Eye Tracker. *Educational Psychology Review*, 33(1), 11–26. <https://doi.org/10.1007/s10648-020-09540-2>
- Rosenzweig, E. Q., & Wigfield, A. (2017). What if reading is easy but unimportant? How students' patterns of affirming and undermining motivation for reading information texts predict different reading outcomes. *Contemporary Educational Psychology*, 48, 133–148. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2016.09.002>
- Rouder, J. N., Speckman, P. L., Sun, D., Morey, R. D., & Iverson, G. (2009). Bayesian t tests for accepting and rejecting the null hypothesis. *Psychonomic Bulletin & Review*, 16(2), 225–237. <https://doi.org/10.3758/PBR.16.2.225>
- Rousseeuw, P. J. (1987). Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 20, 53–65. [https://doi.org/10.1016/0377-0427\(87\)90125-7](https://doi.org/10.1016/0377-0427(87)90125-7)

- Rumelhart, D. E. (1977). Toward an Interactive Model of Reading. *Attention and Performance VI*, 719–747. <https://doi.org/10.4324/9781003309734-31>
- Rumelhart, D. E., & McClelland, J. L. (1982). An interactive activation model of context effects in letter perception: II. The contextual enhancement effect and some tests and extensions of the model. *Psychological Review*, 89(1), 60–94. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.89.1.60>
- Russ, K. M. I. (1989). Relating Reading Attitude to Reading Achievement in an East Los Angeles Junior High School. *Reading Improvement*, 26(3), 208–214.
- Scaltritti, M., & Balota, D. A. (2013). Are all letters really processed equally and in parallel? Further evidence of a robust first letter advantage. *Acta Psychologica*, 144(2), 397–410. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2013.07.018>
- Scarborough, H. S. (2001). Connecting early language and literacy to later reading (dis)abilities: Evidence, theory and practice. In Dickinson David K. & Neuman Susan B. (Eds.), *Handbook of early literacy research* (Vol. 1, pp. 97–110). Guilford Press.
- Scheele, A., Leseman, P., & Maro, A. (2010). The home language environment of monolingual and bilingual children and their language proficiency. *Applied Psycholinguistics*, 31(1), 117–140. <https://doi.org/10.1017/S0142716409990191>
- Schiff, R., Raveh, M., & Figchel, A. (2012). The Development of the Hebrew Mental Lexicon: When Morphological Representations Become Devoid of Their Meaning. *Scientific Studies of Reading*, 16(5), 383–403. <https://doi.org/10.1080/10888438.2011.571327>
- Schubert, T., Badcock, N., & Kohnen, S. (2017). Development of children’s identity and position processing for letter, digit, and symbol strings: A cross-sectional study of the

- primary school years. *Journal of Experimental Child Psychology*, *162*, 163–180.  
<https://doi.org/10.1016/J.JECP.2017.05.008>
- Segui, J., & Grainger, J. (1990). Priming Word Recognition With Orthographic Neighbors: Effects of Relative Prime-Target Frequency. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *16*(1), 65–76. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.16.1.65>
- Seidenberg, M. S., & McClelland, J. L. (1989). A distributed, developmental model of word recognition and naming. *Psychological Review*, *96*(4), 523–568.  
<https://doi.org/10.1037/0033-295X.96.4.523>
- Seymour, P. H. K. (1997). Foundations of orthographic development. In *Learning to spell: Research, theory, and practice across languages*. (pp. 319–337). Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- Share, D. L. (1995). Phonological recoding and self-teaching: sine qua non of reading acquisition. *Cognition*, *55*(2), 151–218. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(94\)00645-2](https://doi.org/10.1016/0010-0277(94)00645-2)
- Snell, J., Cauchi, C., Grainger, J., & Lété, B. (2021). Attention extends beyond single words in beginning readers. *Attention, Perception, and Psychophysics*, *83*(1), 238–246.  
<https://doi.org/10.3758/S13414-020-02184-Y/FIGURES/3>
- Snell, J., Declerck, M., & Grainger, J. (2017). Parallel semantic processing in reading revisited: effects of translation equivalents in bilingual readers. *https://doi.org/10.1080/23273798.2017.1392583*, *33*(5), 563–574.  
<https://doi.org/10.1080/23273798.2017.1392583>
- Snell, J., & Grainger, J. (2017). The sentence superiority effect revisited. *Cognition*, *168*, 217–221. <https://doi.org/10.1016/J.COGNITION.2017.07.003>



- Snell, J., & Grainger, J. (2019). Readers Are Parallel Processors. *Trends in Cognitive Sciences*, 23(7), 537–546. <https://doi.org/10.1016/J.TICS.2019.04.006>
- Snell, J., Mathôt, S., Mirault, J., & Grainger, J. (2018). Parallel graded attention in reading: A pupillometric study. *Scientific Reports*, 8(1), 3743. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22138-7>
- Snell, J., Meeter, M., & Grainger, J. (2017). Evidence for simultaneous syntactic processing of multiple words during reading. *PLOS ONE*, 12(3), e0173720. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0173720>
- Snell, J., van Leipsig, S., Grainger, J., & Meeter, M. (2018). OB1-reader: A model of word recognition and eye movements in text reading. *Psychological Review*, 125(6), 969–984. <https://doi.org/10.1037/REV0000119>
- Soares, A. P., Lages, A., Oliveira, H., & Hernández, J. (2019). The mirror reflects more for d than for b: Right asymmetry bias on the visual recognition of words containing reversal letters. *Journal of Experimental Child Psychology*, 182, 18–37. <https://doi.org/10.1016/J.JECP.2019.01.008>
- Soares, A. P., Lages, A., Velho, M., Oliveira, H. M., & Hernández-Cabrera, J. (2021). The mirror reflects more for genial than for casual: right-asymmetry bias on the visual word recognition of words containing non-reversal letters. *Reading and Writing*, 34(6), 1467–1489. <https://doi.org/10.1007/S11145-020-10100-X/TABLES/2>
- Spencer, J. P. (2020). The development of working memory. *Current Directions in Psychological Science*, 29(6), 545. <https://doi.org/10.1177/0963721420959835>

- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2016.02.007>
- Sperlich, A., Schad, D. J., & Laubrock, J. (2015). When preview information starts to matter: Development of the perceptual span in German beginning readers. *Journal of Cognitive Psychology, 27*(5), 511–530. <https://doi.org/10.1080/20445911.2014.993990>
- Spinelli, G., Colombo, L., & Lupker, S. J. (2022). Consonant and vowel transposition effects during reading development: A study on Italian children and adults. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 75*(11), 2023–2042. <https://doi.org/10.1177/17470218211066301>
- Sprenger-Charolles, L., Colé, P., Béchennec, D., & Kipffer-Piquard, A. (2005). French normative data on reading and related skills from EVALEC, a new computerized battery of tests (end Grade 1, Grade 2, Grade 3, and Grade 4). *Revue Européenne de Psychologie Appliquée, 55*(3), 157–186. <https://doi.org/10.1016/J.ERAP.2004.11.002>
- Stanovich, K. E., & West, R. F. (1989). Exposure to Print and Orthographic Processing. *Reading Research Quarterly, 24*(4), 402. <https://doi.org/10.2307/747605>
- Sternberg, S. (1969). The discovery of processing stages: Extensions of Donders' method. *Acta Psychologica, 30*, 276–315. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(69\)90055-9](https://doi.org/10.1016/0001-6918(69)90055-9)
- Sternberg, S. (2011). Modular processes in mind and brain. *Cognitive Neuropsychology, 28*(3–4), 156–208. <https://doi.org/10.1080/02643294.2011.557231>

- Taft, M., & Forster, K. I. (1975). Lexical storage and retrieval of prefixed words. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 14(6), 638–647. [https://doi.org/10.1016/S0022-5371\(75\)80051-X](https://doi.org/10.1016/S0022-5371(75)80051-X)
- Thorndike, R. L. (1953). Who belongs in the family? *Psychometrika*, 18(4), 267–276. <https://doi.org/10.1007/BF02289263>
- 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. <https://doi.org/10.1080/20445911.2014.999076>
- Tóth, D., & Csépe, V. (2017). Adaptive specialization in position encoding while learning to read. *Developmental Science*, 20(3). <https://doi.org/10.1111/DESC.12426>
- Treiman, R., & Bourassa, D. C. (2000). The development of spelling skill. *Topics in Language Disorders*, 20(3), 1–18. <https://doi.org/10.1097/00011363-200020030-00004>
- Treiman, R., & Cassar, M. (1997). Spelling acquisition in English. In *Learning to spell: Research, theory, and practice across languages*. (pp. 61–80). Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- 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), 480–498. <https://doi.org/10.1037/A0013027>
- Universalis. (2023). *Écriture (notion de base)*. Encyclopædia Universalis. <https://www.universalis.fr/encyclopedie/ecriture-notions-de-base/>
- van Heuven, W. J. B., Mandera, P., Keuleers, E., & Brysbaert, M. (2014). Subtlex-UK: A New and Improved Word Frequency Database for British English. *Quarterly Journal of*

*Experimental Psychology*, 67(6), 1176–1190.  
<https://doi.org/10.1080/17470218.2013.850521>

Vansteenkiste, M., Sierens, E., Soenens, B., Luyckx, K., & Lens, W. (2009). Motivational profiles from a self-determination perspective: The quality of motivation matters. *Journal of Educational Psychology*, 101(3), 671–688. <https://doi.org/10.1037/A0015083>

Varga, V., Tóth, D., & Csépe, V. (2020). Orthographic-Phonological Mapping and the Emergence of Visual Expertise for Print: A Developmental Event-Related Potential Study. *Child Development*, 91(1), e1–e13. <https://doi.org/10.1111/CDEV.13159>

Vejnović, D., & Zdravković, S. (2015). Side flankers produce less crowding, but only for letters. *Cognition*, 143, 217–227. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2015.07.003>

Vernet, M., Bellocchi, S., Leibnitz, L., Chaix, Y., & Ducrot, S. (2022). Predicting future poor readers from pre-reading visual skills: A longitudinal study. *Applied Neuropsychology: Child*, 11(3), 480–494. <https://doi.org/10.1080/21622965.2021.1895790>

Vidal, C., Content, A., & Chetail, F. (2017). BACS: The Brussels Artificial Character Sets for studies in cognitive psychology and neuroscience. *Behavior Research Methods*, 49(6), 2093–2112. <https://doi.org/10.3758/s13428-016-0844-8>

VYGOTSKY, L. S. (1980). *Mind in Society* (M. Cole, V. Jolm-Steiner, S. Scribner, & E. Souberman, Eds.). Harvard University Press. <https://doi.org/10.2307/j.ctvjf9vz4>

Wang, X. (2021). Understanding multiple reading attitude profiles of Chinese adolescents and how they relate to reading outcomes. *Journal of Research in Reading*, 44(3), 490–507. <https://doi.org/10.1111/1467-9817.12352>

- Wen, Y., Snell, J., & Grainger, J. (2019). Parallel, cascaded, interactive processing of words during sentence reading. *Cognition*, *189*, 221–226. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2019.04.013>
- Wesseling, R., & Reitsma, P. (2000). The transient role of explicit phonological recoding for reading acquisition. *Reading and Writing* *2000* *13:3*, *13(3)*, 313–336. <https://doi.org/10.1023/A:1026432502088>
- Wheeler, D. D. (1970). Processes in word recognition. *Cognitive Psychology*, *1(1)*, 59–85. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(70\)90005-8](https://doi.org/10.1016/0010-0285(70)90005-8)
- 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* *2001* *8:2*, *8(2)*, 221–243. <https://doi.org/10.3758/BF03196158>
- Whitney, C., & Cornelissen, P. (2008). SERIOL Reading. *Language and Cognitive Processes*, *23(1)*, 143–164. <https://doi.org/10.1080/01690960701579771>
- Whitney, D., & Levi, D. M. (2011). Visual Crowding: a fundamental limit on conscious perception and object recognition. *Trends in Cognitive Sciences*, *15(4)*, 160. <https://doi.org/10.1016/J.TICS.2011.02.005>
- Wigfield, A., Gladstone, J. R., & Turci, L. (2016). Beyond Cognition: Reading Motivation and Reading Comprehension. *Child Development Perspectives*, *10(3)*, 190–195. <https://doi.org/10.1111/cdep.12184>
- Winkel, H., & Perea, M. (2018). Do the characteristics of the script influence responses to mirror letters? . In N. Mani, K. Mishra, & F. Huettig (Eds.), *The Interactive mind: Language, Vision and Attention* (pp. 41–46). Basingstoke: Macmillan.

- Wong, A. C. N., Gauthier, I., Woroch, B., DeBuse, C., & Curran, T. (2005). An early electrophysiological response associated with expertise in letter perception. *Cognitive, Affective and Behavioral Neuroscience*, 5(3), 306–318. <https://doi.org/10.3758/CABN.5.3.306>
- Wormington, S. V., Corpus, J. H., & Anderson, K. G. (2012). A person-centered investigation of academic motivation and its correlates in high school. *Learning and Individual Differences*, 22(4), 429–438. <https://doi.org/10.1016/J.LINDIF.2012.03.004>
- Yarkoni, T., Balota, D., & Yap, M. (2008). Moving beyond Coltheart's N: A new measure of orthographic similarity. *Psychonomic Bulletin and Review*, 15(5), 971–979. <https://doi.org/10.3758/PBR.15.5.971>
- 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(4), 1026–1036. <https://doi.org/10.1037/a0035187>
- Ziegler, J. C., Ferrand, L., Jacobs, A. M., Rey, A., & Grainger, J. (2000). Visual and phonological codes in letter and word recognition: evidence from incremental priming. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology. A, Human Experimental Psychology*, 53(3), 671–692. <https://doi.org/10.1080/713755906>
- Ziegler, J. C., & Goswami, U. (2005). Reading acquisition, developmental dyslexia, and skilled reading across languages: a psycholinguistic grain size theory. *Psychological Bulletin*, 131(1), 3–29. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.131.1.3>

- Ziegler, J. C., Hannagan, T., Dufau, S., Montant, M., Fagot, J., & Grainger, J. (2013). Transposed-Letter Effects Reveal Orthographic Processing in Baboons. *Psychological Science*, 24(8), 1609–1611. <https://doi.org/10.1177/0956797612474322>
- Ziegler, J. C., Pech-Georgel, C., Dufau, S., & Grainger, J. (2010). Rapid processing of letters, digits and symbols: what purely visual-attentional deficit in developmental dyslexia? *Developmental Science*, 13(4). <https://doi.org/10.1111/J.1467-7687.2010.00983.X>
- Zou, G. Y. (2007). Toward using confidence intervals to compare correlations. *Psychological Methods*, 12(4), 399–413. <https://doi.org/10.1037/1082-989X.12.4.399>

# DECLARATION

Je soussigné Brice Brossette 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 14 mai 2023.