

MEMOIRE

En vue de l'obtention du
Certificat de Capacité d'Orthophoniste
présenté par

Magali GROSS

soutenu publiquement en juin 2021

**Etude électrophysiologique des mécanismes de
détection de l'erreur dans des contextes langagiers
et non langagiers
Comparaison entre sujets dyslexiques et bons lecteurs**

MEMOIRE dirigé par

Gwendoline MAHE, Maître de conférences, SCALab, Université de Lille

Clémence ROGER, Maître de conférences, SCALab, Université de Lille

Remerciements

Je remercie tout d'abord les membres du jury pour la lecture de mon travail présenté dans ce mémoire et pour son évaluation. Je remercie mes maîtres de mémoire, Gwendoline Mahé et Clémence Roger, pour leur grande disponibilité et leurs précieux conseils livrés durant ces deux années de travail.

Je remercie mes parents, veillant toujours à la réunion des meilleures conditions possibles au service de ma réussite, depuis la préparation des concours jusqu'à ce jour. A Lille, à Antony, partout en France, je vous remercie pour le soutien moral et matériel que vous m'avez apporté au fil des années. C'est tout naturellement que ce travail vous est dédié.

Je remercie Julien, pour m'avoir transmis la capacité à s'épanouir dans la difficulté. L'endurance que l'activité sportive forge, toutes nos heures passées à nous dépasser, ne sont pas sans lien avec l'achèvement de ces cinq années d'études.

Je remercie également les autres membres de ma famille qui ont été présents durant mon cursus et particulièrement lors de cette dernière année.

Je remercie Jules, dont l'épaule, même à mille kilomètres, m'a si souvent accueillie. Je remercie également sa famille pour tous les moments ressourçants partagés.

Je remercie Grégoire, pour m'avoir proposé son aide et pour le temps accordé à me guider pour les manipulations statistiques.

Je remercie mes maîtres de stage, qui ont été d'un grand soutien dans mon travail. Je les remercie aussi pour leur présence, qui durant cette année où l'isolement social était de rigueur, ont été bien plus que des maîtres de stage.

Je remercie chaleureusement Brigitte, pour sa transmission de connaissances orthophoniques, mais aussi pour son authenticité ainsi que pour les opportunités professionnelles se profilant à présent pour ma poursuite d'études en diététique.

Résumé : Des erreurs fréquentes de lecture sont retrouvées dans la dyslexie. Celles-ci sont plus difficilement identifiées par un individu dyslexique qu'un normolecteur. En situation non langagière, la présence de ce déficit restait à déterminer, afin de préciser le profil cognitif retrouvé dans la dyslexie, mieux comprendre ce trouble et améliorer sa prise en charge. Six sujets dyslexiques et sept normolecteurs ont participé à une tâche de décision lexicale et à une tâche de Simon. Des mesures électroencéphalographiques (EEG) et électromyographiques (EMG) ont été enregistrées, mais seules des mesures comportementales ont pu être exploitées, au moyen d'analyses générales et distribuées par quantiles des données. Pour la tâche de décision lexicale et pour les essais incompatibles de la tâche de Simon, les résultats généraux montrent un ralentissement des réponses des sujets dyslexiques comparativement aux normolecteurs. Des différences surprenantes entre les groupes ressortent de l'analyse distribuée. Pour la tâche de Simon, les résultats sont globalement similaires mais les sujets dyslexiques semblent devenir plus performants que les normolecteurs à mesure que les temps de réactions (TRs) augmentent. Pour la tâche de décision lexicale, des effets de lexicalité divergents laissent penser que les erreurs ont des origines différentes selon les groupes. Les troubles cognitifs des sujets dyslexiques semblent donc avoir des conséquences sur la tâche de décision lexicale, mais pas sur la tâche de Simon. Ces résultats ne peuvent suggérer d'altération générale du contrôle cognitif dans la dyslexie à ce stade d'analyse. Le traitement des données EEG et EMG est requis pour étayer nos observations.

Mots-clés : dyslexie, contrôle cognitif, décision lexicale, tâche de Simon, interférence

Abstract: Contrary to expert readers, dyslexic readers struggle to identify their errors in linguistic situations. The existence of such deficiency in a nonlinguistic context remained to be defined in order to determine the cognitive control in dyslexia, and therefore enhance its understanding and develop the therapeutic perspectives. Six dyslexic readers and seven expert readers have participated in a visual lexical decision paradigm and in a Simon's task. Electroencephalographic and electromyographic signals were recorded, however only performance data (reaction times and accuracy) could be exploited through general analysis and quantile distribution. This quantile distribution was obtained by plotting accuracy rates for trials as a function of reaction times (RTs) and plotting interference effects as a function of RTs. Global results described slower RTs among dyslexic subjects than among non-dyslexic ones for the lexical decision paradigm and some aspects of the Simon's task. Unexpected differences between the two groups emerged. Considering Simon's task, initial results were similar, but the higher the recorded RTs the more efficient the dyslexics subjects seemed to be compared to expert readers. On the other hand, the lexical decision paradigm showed divergent lexicality effects which lead to imagine that the origin of the errors was not the same depending on the group. Thus, dyslexia appears to have an effect on the lexical decision paradigm results, but not on Simon's task's. From this point these results cannot suggest an overall impairment of cognitive control in dyslexia. To support the observations, an analysis of the electrophysiologic data is required.

Keywords: dyslexia, cognitive control, lexical decision, Simon task, interference

Table des matières

Introduction	1
Contexte théorique	2
1. L'apprentissage de la lecture et la dyslexie	2
1.1. Les mécanismes impliqués dans la lecture	2
1.1.1. Les deux voies de la lecture (Coltheart et al., 2001)	2
1.1.2. Le rôle des processus de contrôle cognitif	2
1.2. L'erreur dans le développement du langage écrit	4
1.2.1. Les piliers de l'apprentissage et la nécessité de l'erreur	4
1.2.2. Erreurs fréquentes et traitement du langage écrit.....	4
1.3. La dyslexie	5
1.3.1. Définition et critères diagnostiques.....	5
1.3.2. Les hypothèses étiologiques de la dyslexie.....	6
1.3.3. Les comorbidités observées dans la dyslexie.....	7
2. La mesure des processus de contrôle cognitif	8
2.1. L'étude des processus de contrôle via l'électrophysiologie	8
2.1.1. L'onde ERN.....	8
2.1.2. L'ébauche d'erreur	9
2.1.3. La conscience de l'erreur	10
2.2. L'étude du contrôle cognitif via l'approche chronométrique.....	11
2.2.1. Le compromis entre vitesse et précision	11
2.2.2. La force de suppression d'une réponse automatique	12
2.2.3. La force d'activation d'une réponse automatique	13
Problématique, buts et hypothèses.....	14
1. Situation initiale.....	14
2. Enrichissement de la problématique	15
Méthode	16
1. Population	16
2. Matériel.....	16
2.1. Tâches pré-expérimentales.....	16
2.2. Tâches expérimentales	17
2.2.1. Tâche langagière (décision lexicale)	17
2.2.2. Tâche non langagière de Simon (Craft & Simon, 1970).....	17
3. Procédure d'analyse.....	18
3.1. Tâches pré-expérimentales.....	18
3.2. Tâches expérimentales	18
3.2.1. Analyse générale des données.....	18
3.2.2. Analyse distributive des données	18

Résultats	19
1. Tâches pré-expérimentales : constitution des groupes	19
2. Tâches expérimentales.....	20
2.1. Analyse générale des données	20
2.1.1. Tâche de décision lexicale	20
2.1.2. Tâche de Simon (Craft & Simon, 1970)	21
2.2. Analyse distributive des données	22
2.2.1. Force d'activation de la réponse automatique (CAF)	22
2.2.1.1. Tâche de décision lexicale	22
2.2.1.2. Tâche de Simon (Craft & Simon, 1970)	23
2.2.1.3. Comparaison inter-tâches et inter-groupes.....	23
2.2.2. Force de suppression de la réponse automatique (delta).....	24
2.2.2.1. Tâche de décision lexicale	25
2.2.2.2. Tâche de Simon (Craft & Simon, 1970)	26
2.2.2.3. Comparaison inter-tâches et inter-groupes.....	26
Discussion	27
1. Rappel de l'objectif et des résultats généraux	27
2. Tâche de décision lexicale	27
3. Tâche de Simon (Craft & Simon, 1970).....	28
4. Comparaison des tâches.....	28
5. Limites	29
6. Conclusion	29
Conclusion	30
Bibliographie.....	31
Annexes.....	1
Annexe 1 : Questionnaire général	1
Annexe 2 : Formulaire de consentement	3
Annexe 3 : Lettre d'information.....	4
Annexe 4 : Questionnaire BIS/BAS (Carver & White, 1994) adapté en version française (Caci et al., 2007)	6
Annexe 5 : Questionnaire BIS-11 (Patton et al., 1995)	7
Annexe 6 : Moyennes des critères d'appariement pour les mots et pseudomots de la tâche de décision lexicale.....	8
Annexe 7 : Données numériques distribuées par quantile permettant le tracé des courbes CAF pour les deux tâches.....	9
Annexe 8 : Courbes CAF individuelles pour les deux tâches.	10
Annexe 9 : Pentés individuelles pour les courbes CAF et delta des deux tâches.....	12
Annexe 10 : données numériques distribuées par quantile permettant le tracé des courbes de densité de probabilité cumulée et les courbes delta.....	13
Annexe 11 : Courbes delta individuelles pour les deux tâches	14

Introduction

Tout apprentissage se fait au contact d'erreurs. Selon Dehaene (2012), elles sont même indispensables : elles permettent à « l'algorithme cérébral » de se reprogrammer sans cesse, de s'adapter constamment à l'environnement. Cette capacité dépend de mécanismes de contrôle, organisant et ajustant les processus de traitement des informations en fonction du contexte. Par exemple, nous faisons davantage attention aux sous-titres d'un film si nous ne maîtrisons pas la langue parlée dans celui-ci. Ces mécanismes de contrôle, au cœur de notre vie quotidienne, peuvent cependant dysfonctionner et être à l'origine d'erreurs de comportement.

L'un des principaux apprentissages d'une vie, lui-même nécessairement à l'origine de beaucoup d'autres, est celui de la lecture. Il commence implicitement via l'environnement de l'enfant et devient méthodique en classe de CP. L'enseignant propose une méthode, la méthode syllabique étant la plus fréquente (Deauvieu, 2018), permettant à l'enfant une entrée dans le langage écrit avec les bonnes clefs, phonèmes et graphèmes, en main. Cet apprentissage est un processus difficile puisque long, répétitif et porteur de règles ; pour autant les enfants normolecteurs parviennent après plusieurs années à acquérir une lecture fluide et exacte. Cependant, cet apprentissage est parfois source de difficultés importantes. Si celles-ci deviennent persistantes et qu'elles ne sont pas dues à un déficit sensoriel, psychologique, neurologique ou psychoaffectif, elles pourront évoquer une dyslexie, dont la prévalence est estimée entre 6 et 8,5% en France (Barrouillet et al., 2007). Chez les personnes dyslexiques, les erreurs de lecture et d'orthographe sont plus fréquentes que chez un individu normolecteur, ou bien celles-ci seront évitées au prix d'un fort coût cognitif.

Les mesures électroencéphalographiques ont permis de mesurer une onde cérébrale dans les régions frontales, survenant quelques millisecondes après la commission d'une erreur, appelée « onde d'erreur » ou Error-Related Negativity (ERN). Elle a d'abord été observée dans des tâches non langagières. Depuis, Horowitz-Kraus et Breznitz (2008) ont montré que l'amplitude de l'onde d'erreur était plus faible chez les sujets dyslexiques que normolecteurs lors de la réalisation d'une tâche de décision lexicale, suggérant un déficit de détection de l'erreur chez les sujets dyslexiques en contexte langagier. Il serait intéressant de savoir si ce déficit se retrouve aussi lors de la manipulation de matériel non langagier. Un autre indice permettant d'évaluer les capacités du contrôle cognitif est le contrôle de l'interférence. Il permet de retenir des éléments pertinents parmi un flot d'informations parfois compétitives, et est nécessairement impliqué pour éviter une erreur. Chez des sujets avec Trouble du Déficit de l'Attention avec Hyperactivité (TDAH), ce contrôle est atteint : une plus grande propension à répondre automatiquement mais aussi des difficultés à inhiber cet automatisme, sont observées (Grandjean, 2020). Le contrôle de l'interférence, participant à la surveillance des erreurs, demeure à explorer dans la dyslexie.

Le travail de recherche exposé dans ce mémoire poursuit le chemin d'Horowitz-Kraus et Breznitz (2008) en élaborant une nouvelle étude, comparant contextes langagier et non langagier, avec enregistrements électroencéphalographique (EEG) et électromyographique (EMG). Au cours du projet, la situation sanitaire a rendu impossible l'analyse EEG et EMG. Une étape intermédiaire portant sur la chronométrie mentale, motivée par la thèse de Grandjean (2020), est donc apparue comme une perspective d'analyse possible et pertinente puisqu'elle pourra être juxtaposée ultérieurement à l'analyse EEG et EMG. Dans ce mémoire, nous abordons les caractéristiques de la dyslexie, la place de l'erreur dans l'apprentissage ainsi que les apports électrophysiologiques et chronométriques dans l'étude de la surveillance des erreurs. La méthodologie et les résultats de l'étude sont ensuite présentés et discutés.

Contexte théorique

1. L'apprentissage de la lecture et la dyslexie

1.1. Les mécanismes impliqués dans la lecture

1.1.1. Les deux voies de la lecture (Coltheart et al., 2001)

La reconnaissance visuelle et la lecture à haute voix de mots écrits s'opèrent selon le modèle à double voie en cascade proposé par Coltheart et al. (2001). Selon ce modèle, face à un mot écrit, une compétition entre deux voies activées conjointement est lancée pour permettre sa lecture à haute voix. Ce modèle peut aussi rendre compte de la lecture silencieuse.

La première voie, dite voie sublexicale, est basée sur des règles de conversion graphème-phonème et, par activations unidirectionnelles de chacun des niveaux suivants, le mot est lu : le stimulus visuel est décomposé en traits visuels, puis en lettres, qui sont ensuite converties en phonèmes grâce à la conversion grapho-phonémique, puis concourent vers le système phonémique de sortie avant d'être prononcés et de constituer un mot. Le traitement des lettres est séquentiel : de gauche à droite, chaque lettre (ou groupe de lettres) est associée au son qui lui correspond. Cette voie est nécessairement utilisée pour les mots que le lecteur n'a jamais rencontrés. Elle est donc fortement sollicitée au cours de l'apprentissage de la lecture ou lors de l'exposition à des mots nouveaux, et ce à tout âge selon les expériences de lecture de chacun. Cette voie permet également de lire des mots qui n'existent pas mais qui respectent les règles grapho-phonémiques, les pseudomots, comme « chapiron » par exemple.

La seconde voie, dite lexicale, est décrite par des activations unidirectionnelles et bidirectionnelles entre les lettres, le lexique orthographique d'entrée, le système sémantique, le lexique phonologique de sortie et le système phonémique. Ce n'est plus un traitement séquentiel des lettres qui est effectué mais un traitement parallèle de celles-ci : le mot est recherché dans le lexique mental orthographique où les représentations des mots déjà lus antérieurement sont stockées. Les lexiques phonologique et phonémique de sortie sont ensuite activés, le mot est lu à haute voix. Cette voie, en plus de permettre un accès à la signification du mot, est plus rapide et moins coûteuse. Elle tend à être de plus en plus utilisée à mesure que la lecture devient experte. D'autre part, elle est nécessairement utilisée pour la lecture de mots irréguliers, qui ne suivent pas les règles de conversion grapho-phonémique, comme « monsieur » par exemple.

1.1.2. Le rôle des processus de contrôle cognitif

Par voie lexicale ou sublexicale, la lecture ne peut être une activité purement langagière. Elle requiert en effet la coordination de plusieurs unités langagières comme les phonèmes, les graphèmes et les morphèmes, et fait intervenir la sémantique, la syntaxe et des stratégies permettant d'accéder à la compréhension (Cartwright, 2012). Le contrôle cognitif permet la coordination de ces diverses composantes et donc le développement d'une lecture efficace.

Le contrôle cognitif est défini par l'habileté à sélectionner des informations pour la réalisation d'un but particulier, tout en inhibant les informations qui ne sont pas pertinentes à la réalisation de ce but (Morton et al., 2011). Le contrôle cognitif comprend plusieurs processus de contrôle, appelés également fonctions exécutives (Cohen, 2017).¹ Dès le plus jeune âge, des processus de contrôle cognitif commencent à se développer. Dès quatre mois, l'activité cérébrale

¹ Pour Cohen (2017), les termes sont interchangeable car la nuance est davantage historique et fonctionnelle que conceptuelle. En effet, les fonctions exécutives sont décrites dans des constructions neuropsychologiques anciennes et évoquent principalement des batteries particulières de tâches (Cohen, 2017).

de nourrissons engagés dans une activité d'attention conjointe témoigne de processus mnésiques et attentionnels (Cartwright, 2012). Le développement de ces compétences se poursuit jusqu'à l'âge adulte. L'implication des processus de contrôle cognitif est de rigueur dans la réalisation d'activités quotidiennes, d'une simple traversée d'un passage piéton à la rédaction d'un texte.

Concernant la lecture, Cartwright souligne le rôle essentiel des processus de contrôle cognitif (2012). En effet, ceux-ci interviennent dans le développement des compétences de lecture. L'auteure évoque leur implication dans le domaine spécifiquement phonologique, dans des tâches de conscience et de mémoire phonologique et de dénomination rapide, qui sont prédictives des compétences en lecture (Cartwright, 2012). Mais elle souligne également, pour des tâches non langagières, la corrélation des capacités de lecture avec le niveau de flexibilité mentale, celle-ci étant la capacité à adapter un chemin de pensée ou d'action selon le changement d'exigences d'une situation (Loftis, 2011). Cartwright ajoute que la mémoire de travail, soit le stockage à court terme et la manipulation d'informations (Sweet & Jerskey, 2011), et l'attention prédisent les compétences de lecture à la fin de la maternelle (2012).

Le modèle intégratif de la lecture DIER (Direct and Indirect Effects model or Reading) proposé par Kim (2020) illustre la multimodalité d'une telle activité, où les processus de contrôle sont acteurs. Ils sont représentés dès le socle de la Figure 1, par l'intervention de la mémoire de travail, de la flexibilité, de l'attention ainsi que de l'inhibition, cette dernière étant le blocage d'une action, d'une pensée ou d'un processus (Kuczynski & Kolakowsky-Hayner, 2011). Selon ce modèle, lire et comprendre ce qui est lu est aussi le fruit d'interactions unidirectionnelles et bidirectionnelles entre la lecture de mots, la fluence de lecture, les connaissances de base, les aspects sociaux-émotionnels et la compréhension orale soumise à des processus cognitifs de niveau supérieur (inférences, raisonnement, prises de perspective, autocontrôle et régulation).

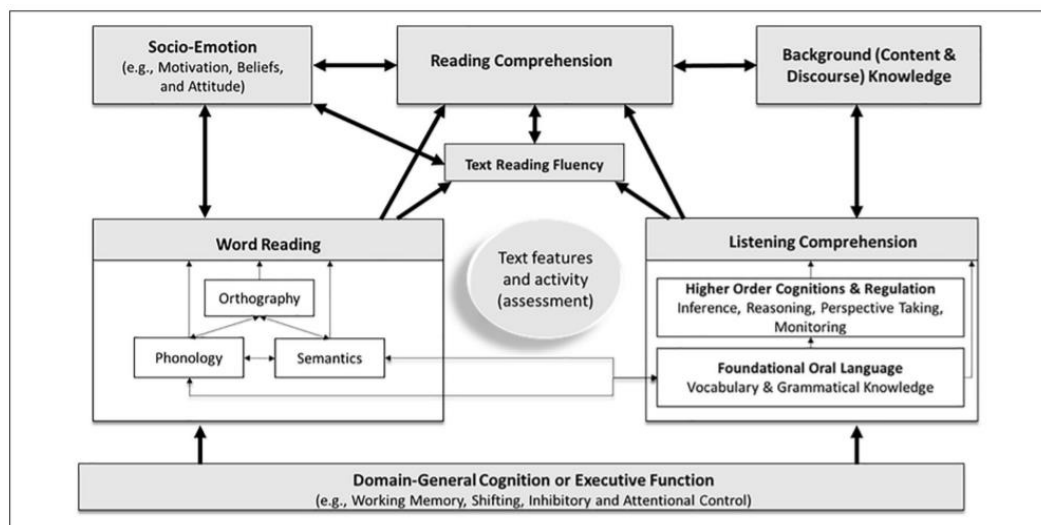


Figure 1. Modèle DIER (Direct and Indirect Effects model or Reading) de la lecture, issu de Kim (2020).

Plus précisément, Nouwens et al. (2021) soulevaient encore récemment l'implication de la mémoire de travail et de l'inhibition au service d'une voie phonologique efficiente. Quant à la compréhension de texte, celle-ci est sous-tendue par la mémoire de travail et la planification, cette dernière étant définie par la capacité à concevoir l'ordre particulier des étapes nécessaires à la résolution d'un objectif (Unterrainer & Owen, 2006).

1.2. L'erreur dans le développement du langage écrit

1.2.1. Les piliers de l'apprentissage et la nécessité de l'erreur

Dans un colloque de rencontre entre deux disciplines, les sciences cognitives et l'éducation, Stanislas Dehaene explicitait le mécanisme de l'apprentissage par une représentation analogue, touchant au domaine des mathématiques : il soutenait que le cerveau comportait un « algorithme » d'apprentissage, dont l'utilisation efficace nécessitait l'intervention de quatre grands piliers (2012). Le premier pilier, l'intervention de l'attention au service des apprentissages, permet de sélectionner l'information et de moduler son traitement. Le deuxième pilier, l'impact de l'engagement actif de la part de l'enfant et de ses processus métacognitifs, lui permet de « savoir lorsqu'il ne sait pas » (Dehaene, 2012). Être en capacité d'admettre ses méconnaissances amène naturellement Dehaene à traiter du sujet de l'erreur chez l'enfant. Les erreurs modèlent « l'algorithme » de l'apprentissage. Qu'elles soient relevées par l'enseignant ou détectées par l'apprenant lui-même, elles sont primordiales pour apprendre. La détection des erreurs permet un retour d'information (ou feedback), troisième pilier avancé, qui ajuste « l'algorithme » du cerveau, ses prédictions sur le monde extérieur. En effet, l'apprentissage peut démarrer seulement si un signal d'erreur, signe d'une prévision imparfaite de « l'algorithme », vient le façonner. Ceci est valable pour tous les apprentissages y compris la lecture. Cela suggère que « faire des erreurs ... est une partie intégrante et même indispensable de l'apprentissage. On ne peut pas apprendre sans erreur » (Dehaene, 2012). Le dernier pilier est celui de la consolidation. Il s'agit d'une étape essentielle : en consolidant ses apprentissages, l'enfant libère des ressources pour se concentrer sur d'autres éléments. Ainsi, en lecture, consolider son décodage permet d'accéder au sens du texte. Cette consolidation est soumise à certains facteurs comme le sommeil (Dehaene, 2012).

Selon les critères diagnostiques de la dyslexie décrits dans le DSM-5, Manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux (American Psychiatric Association ; APA, 2015), le sujet dyslexique fait plus d'erreurs de lecture ou n'accède pas au sens de ce qu'il lit, et/ou présente des difficultés d'orthographe avec antécédents de difficultés de lecture. Les erreurs commises ne semblent donc pas lui profiter autant qu'au bon lecteur.

1.2.2. Erreurs fréquentes et traitement du langage écrit

L'effet négatif d'erreurs répétées et persistantes retrouvées dans la dyslexie s'explique simplement par le modèle de la lecture proposé par Hoover et Gough en 1990. Selon ce modèle, la compréhension écrite est le produit de deux composantes, la compréhension orale et la reconnaissance de mots écrits (Hoover & Gough, 1990). Si l'un des deux facteurs est altéré, la compréhension écrite en est par conséquent touchée.

Au début de l'apprentissage de la lecture, et en l'absence d'un trouble du langage oral et/ou écrit, il est normal que cette compréhension écrite soit réduite car la reconnaissance de mots écrits, au stade de décodage, est laborieuse. L'enfant décode en utilisant sa voie sublexicale, il réalise une conversion graphème-phonème qui n'est au départ pas automatique (Coltheart et al., 2001). Au fur et à mesure, l'enfant utilise de plus en plus sa voie lexicale, il active les représentations orthographiques qu'il a stockées en mémoire. Cette procédure est moins coûteuse, les mots sont reconnus plutôt que décodés. L'enfant peut alors se concentrer sur le sens de ce qu'il lit. Si l'on suit le modèle de Hoover et Gough (1990), la compréhension écrite devient ainsi meilleure. Chez le sujet dyslexique, les difficultés persisteront : la reconnaissance de mots écrits restera soit laborieuse, soit inexacte, et la compréhension écrite en sera altérée.

Si un mot est lu sans erreur, il ne sera pas nécessairement écrit correctement, car des connaissances exactes concernant l'identité et la position des lettres seront requises (Giguere et al., 2002). Les erreurs orthographiques commises auront des impacts positifs et négatifs. Tout d'abord, tout comme pour la lecture, il est illusoire d'empêcher les erreurs. Au contraire, elles peuvent même faire partie intégrante d'une méthode d'apprentissage visant une production phonologiquement correcte plutôt que lexicalement correcte d'emblée (Rey et al., 2005) : l'erreur est encouragée afin de viser la mise en place des correspondances grapho-phonémiques. Mais d'autre part, les erreurs orthographiques tendent à être mémorisées, à interférer avec l'orthographe correcte et ainsi à altérer les performances ultérieures, même chez l'adulte (Fayol & Jaffré, 2008 ; Stanké et al., 2016). Dans une thèse encadrée par Pacton, Carrion soutient que l'impact négatif de l'exposition aux erreurs serait d'autant plus marqué chez les sujets disposant de moins bonnes connaissances orthographiques, et ce en dépit d'une rétroaction corrective (Carrion, 2010). Dans une étude qui visait à comparer un mode d'apprentissage avec erreur et un mode d'apprentissage sans erreur de pseudomots en classe de CM2, l'impact délétère d'une exposition aux erreurs, d'autant plus important chez les faibles orthographes, a également été retrouvé (Stanké et al., 2016). Les performances étaient meilleures concernant l'écriture de pseudomots appris selon la méthode d'enseignement sans erreur qu'avec erreur.

Au vu de la nécessité de détecter ses erreurs, troisième pilier de l'apprentissage (Dehaene, 2012), la question de cette détection se pose ainsi pour le sujet dyslexique. Repère-t-il et évite-t-il des erreurs de la même manière qu'un normolecteur ? Devant les intérêts diagnostiques et rééducatifs mis en jeu, les processus intervenant dans la détection et l'évitement de l'erreur sont donc les fils conducteurs de notre projet.

1.3. La dyslexie

1.3.1. Définition et critères diagnostiques

La dyslexie développementale est un trouble spécifique de l'apprentissage du langage écrit. Ses origines sont neurobiologiques. D'après Lyon et al. (2003), la dyslexie se caractérise par des "difficultés dans la reconnaissance exacte et/ou fluente de mots ainsi que par des capacités orthographiques et de décodage de mots limitées".

Pour poser un diagnostic de dyslexie, selon le DSM-5 (APA, 2015), une personne doit présenter les quatre critères suivants. Premièrement, des difficultés doivent se manifester dans l'apprentissage et l'utilisation d'aptitudes académiques, indiquées par la présence d'au moins un des symptômes d'une liste donnée, persistant depuis au moins six mois malgré des interventions ciblées. Les manifestations possibles sont une lecture de mots inexacte, lente ou laborieuse ; des difficultés d'accès au sens ; des difficultés orthographiques ; des difficultés d'expression écrite ; des difficultés dans la maîtrise du sens des nombres, des faits numériques ou du calcul ; ou encore des difficultés de résolution de problèmes mathématiques. Deuxièmement, le trouble doit interférer significativement avec les performances académiques ou les occupations quotidiennes reposant sur la lecture. Troisièmement, le trouble peut démarrer à l'école mais peut s'exprimer seulement lorsque les demandes (contraintes de temps, énoncés complexes et longs, contenu pédagogique chargé) excèdent les capacités limitées de l'individu. Enfin, les difficultés rencontrées ne doivent pas s'expliquer par un trouble psychologique, un environnement défavorable, une pathologie neurologique organique ou un trouble sensoriel auditif ou visuel (APA, 2015).

Selon la CIM 10, Classification Internationale des Maladies, poser un diagnostic de dyslexie nécessite la présence d'au moins un critère parmi les suivants (Organisation Mondiale

de la Santé, 1994, p 220). Le sujet doit, soit (1) obtenir une note se situant à -2 écarts-types (ET) en dessous du niveau escompté à une épreuve standardisée d'exactitude ou de compréhension de lecture ; soit (2) obtenir une note se situant à -2 ET en dessous du niveau escompté à un test d'orthographe avec des antécédents de difficultés sévères en lecture ou des résultats de tests ayant répondu au critère (1) à un âge antérieur. D'après ces critères, la pose du diagnostic de dyslexie ne peut avoir lieu qu'après 18 mois de retard d'apprentissage de la lecture (Zorman, 2002). Cette durée est mentionnée dans du matériel d'évaluation orthophonique des troubles du langage écrit, comme dans la batterie de tests de dépistage des dyslexies ODEDYS-2 (Jacquier-Roux et al., 2005).

1.3.2. Les hypothèses étiologiques de la dyslexie

Aujourd'hui, l'hypothèse explicative de la dyslexie la plus prégnante est celle d'un déficit phonologique, décrit par Ramus et Szenkovits en 2008. Cette théorie se base sur la nécessité d'établir des liens entre les graphèmes et les phonèmes pour apprendre à lire, comme le soutient le modèle de Coltheart et al. (2001). Si un déficit phonologique est présent, celui-ci se répercute dans plusieurs domaines, non uniquement dans celui du langage écrit. En effet, d'une part, les sujets dyslexiques ont des scores particulièrement déficitaires en lecture de pseudomots (et ce déficit est plus notable quand la langue est non transparente) par rapport à des individus normolecteurs ainsi qu'une lenteur d'accès lexical. D'autre part, en dehors du traitement du langage écrit, les personnes dyslexiques présentent une faiblesse de la mémoire à court terme auditivo-verbale, soit du stockage passif d'informations verbales (Poncellet et al., 2009). Elles présentent également une mauvaise conscience phonologique, c'est-à-dire des difficultés à identifier et manipuler les phonèmes. Or, la conscience phonologique, la mémoire auditivo-verbale à court terme et la dénomination rapide, cette dernière étant la capacité à nommer une série de stimuli visuels aussi rapidement que possible avec un minimum d'erreurs (Swanson et al., 2003), constituent les facteurs prédictifs de la lecture les plus forts (Elbro & Scarborough, 2004 ; Swanson et al., 2003).

La théorie phonologique soutenue par Ramus et Szenkovits (2008) s'oppose à d'autres théories qui défendent des dysfonctionnements plus généraux chez les sujets dyslexiques. Les difficultés pourraient par exemple s'expliquer par une théorie auditive, avançant une incapacité à percevoir les variations rapides dans le signal de la parole (Tallal, 1980).

Il existe des théories non spécifiques au langage, ni oral ni écrit. Le dysfonctionnement pourrait être d'ordre visuel, comme proposé dans la théorie visuelle, caractérisée par une instabilité monoculaire induisant des difficultés de convergence et de planification des saccades oculaires (Stein & Fowler, 1993). Dans la théorie visuo-attentionnelle proposée par Vidyasagar et Pammer en 2010, ce sont des difficultés d'orientation de l'attention et d'inhibition qui entraveraient la segmentation des mots en unités orthographiques, qui se répercuteraient sur la conversion graphème-phonème. Une autre théorie d'un dysfonctionnement général, la théorie cérébelleuse, naît d'un constat des comorbidités de la dyslexie : une atteinte cérébelleuse, caractérisée par des troubles moteurs, de la coordination et de l'équilibre, est retrouvée dans 80% des cas de dyslexie (Nicolson et al., 2001).

Même si la théorie phonologique demeure la plus retenue à ce jour, les multiples autres théories présentées suggèrent au moins que des composantes non langagières sont engagées dans la dyslexie. Notre projet s'inscrit ainsi dans une démarche d'identification de facteurs non langagiers impliqués dans la dyslexie, en nous intéressant aux capacités de contrôle cognitif.

1.3.3. Les comorbidités observées dans la dyslexie

La lecture n'étant pas une activité purement langagière comme l'illustre le modèle intégratif de la lecture DIER (Kim, 2020), il est intéressant de comparer les profils neuropsychologiques des personnes dyslexiques et des normolecteurs, sur des tâches phonologiques et non phonologiques, pour y relever des comorbidités. C'est ce qu'ont fait Menghini et al. en 2010, en émettant l'hypothèse d'une étiologie multifactorielle de la dyslexie. Leur étude menée auprès de 60 sujets dyslexiques et 65 sujets normolecteurs a montré que les profils neuropsychologiques concernant les déficits, en nombre et en type, des compétences intervenant dans la lecture étaient différents entre les deux groupes. D'après leurs données, l'on peut calculer que, chez les normolecteurs, 92,3% des sujets avaient 3 déficits neuropsychologiques ou moins. Plus précisément, plus de la majorité de normolecteurs n'avaient aucun déficit neuropsychologique et 40% d'entre eux n'en présentaient qu'un ou deux. Chez les sujets dyslexiques, la tendance s'inversait puisque 81,6% d'entre eux étaient concernés par 3 déficits neuropsychologiques ou plus. Plus précisément, 41,7% des sujets dyslexiques en présentaient quatre ou cinq.

Concernant la typologie des déficits relevés par Menghini et al. (2010) chez les sujets dyslexiques, seulement 11 sur 60 avaient un déficit phonologique isolé, alors que 46 d'entre eux présentaient une atteinte multiple. Divers profils ont ainsi émergé. On retrouvait (1) un déficit phonologique couplé à un déficit des fonctions exécutives chez dix sujets dyslexiques, (2) un déficit perceptif visuo-spatial, attentionnel et exécutif chez huit sujets dyslexiques, (3) un déficit attentionnel et perceptif chez cinq sujets dyslexiques, ainsi que (4) un déficit attentionnel et exécutif chez cinq sujets dyslexiques. Ces résultats soutiennent ainsi une hypothèse multifactorielle de la dyslexie et viennent étayer les déficits déjà relevés dans la dyslexie, soit un manque de planification, de flexibilité et d'autocontrôle, des capacités d'autocorrection et d'utilisation d'indices moins bonnes, ainsi qu'un manque d'inhibition dans le traitement d'informations non pertinentes ou dans la production d'une réponse (Menghini et al., 2010).

D'autre part, au-delà des déficits observés chez le sujet dyslexique concernant les différentes capacités intervenant dans la lecture, il existe des comorbidités à un autre niveau, entre pathologies ou syndromes. Habib décrit une véritable « constellation des dys » (2018). Dans une étude menée sur 100 sujets, des comorbidités ont été relevées entre dyslexie et d'autres pathologies (Pauc, 2005) : 62% des sujets dyslexiques avaient également un trouble de déficit de l'attention (contre 5 à 10% de la population), 17% avaient un trouble obsessionnel compulsif (contre 1 à 2% de la population) et 8% avaient un syndrome Gilles de la Tourette (contre 1% de la population). De plus, 85% des sujets dyslexiques étaient également dyspraxiques (Pauc, 2005), contre 6% des enfants ayant entre 5 et 11 ans (APA, 2015). D'autre part, 21% présentaient un TDAH (Pauc, 2005), contre 9,5% de la population (Polanczyk, 2014). Enfin, la dyscalculie et la dyslexie montreraient un taux élevé de comorbidité d'environ 40% (Wilson et al., 2015). Ces tableaux de comorbidités intriquées sont ainsi à prendre en considération lors de l'étude des mécanismes de contrôle cognitif.

2. La mesure des processus de contrôle cognitif

2.1. L'étude des processus de contrôle via l'électrophysiologie ²

2.1.1. L'onde ERN

Lorsqu'une erreur est commise lors d'une tâche de temps de réaction (TR) de choix, une onde de polarité négative, découverte par Falkenstein et al. (1991), se répand dans une région fronto-centrale du cerveau (Van Veen & Carter, 2002). Cette onde, enregistrée par électroencéphalographie (EEG) est liée à la détection de l'erreur au moment de son exécution. D'abord nommée « onde d'erreur », elle a été réétudiée par Gehring et al. en 1993 et nommée « négativité liée à l'erreur » (Error-Related Negativity ; ERN). Cette onde négative atteint son point culminant entre 100 et 150 ms après le début de la réponse motrice (Vidal et al., 2000). Elle est suivie d'une onde appelée « positivité d'erreur » dont le maximum est enregistré entre 200 et 400 ms après le début de la réponse motrice (Pe ; Falkenstein et al., 2000). Contrairement à l'onde négative, l'onde Pe n'est retrouvée qu'en cas d'erreurs conscientes.

L'onde négative, initialement observée lors d'erreurs, a été retrouvée dans d'autres types de réponses lors desquels son amplitude diffère. En effet, une onde négative a été observée lors de petites erreurs corrigées immédiatement, appelées « ébauches d'erreurs », ainsi que lors de réponses correctes. L'amplitude de l'onde négative est la plus élevée lors d'erreurs, d'amplitude intermédiaire lors d'ébauches d'erreurs et de faible amplitude lors d'essais corrects, comme l'illustre la Figure 2. Cette onde négative, appelée onde ERN dans le cas d'erreurs et d'ébauches d'erreurs, et appelée CRN (Correct-Related Negativity) dans le cas d'essais corrects, est ainsi sensible à la performance (Vidal, 2015). L'onde ERN peut être affectée par le vieillissement physiologique, certaines conditions expérimentales ou pathologies. En effet, Vidal rapporte une réduction de l'amplitude de cette onde lors du vieillissement, de la consommation d'alcool ou de la fatigue due à un manque de sommeil ou à une longue expérience (2015). Enfin, une amplitude réduite de l'onde ERN a été retrouvée chez des patients atteints de diverses pathologies. C'est le cas de patients schizophrènes (Mathalon et al., 2002), de patients atteints de la maladie d'Alzheimer (Mathalon et al., 2003) ou de Parkinson (Ito & Kitagawa, 2006).

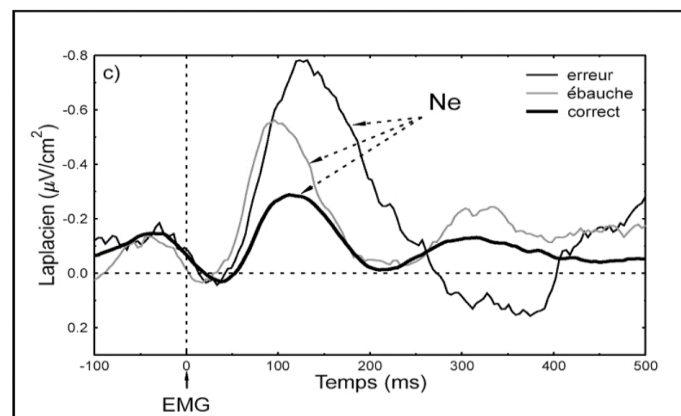


Figure 2. Onde ERN lors d'essai correct, d'ébauche d'erreur et d'erreur, issu de Vidal et al. (2000).

Dans la dyslexie, Horowitz-Kraus et Breznitz (2008 ; 2011a) ont mené des travaux sur les différences de détection de l'erreur entre sujets dyslexiques et normolecteurs. Une première

² En raison de la Covid-19, les mesures EEG et EMG recueillies n'ont pu être analysées. Cet imprévu a motivé un autre type d'analyse, reposant sur des données dont nous disposons, les taux d'erreurs et les TR. Bien que les mesures EEG et EMG ne puissent être analysées dans le cadre de ce mémoire, le choix de diminuer mais de conserver leur développement théorique a été fait car celles-ci sont le socle de l'étude. Elles pourront être analysées ultérieurement.

étude consistait à analyser les capacités de détection de l'erreur dans la dyslexie via l'enregistrement de l'onde ERN, dans une tâche de décision lexicale. Les auteures ont découvert que les sujets dyslexiques présentaient des amplitudes réduites et des latences plus tardives de l'onde ERN lors d'erreurs par rapport aux bons lecteurs, ceci évoquant une altération de la capacité à identifier leurs erreurs lors du traitement de mots écrits (Horowitz-Kraus & Breznitz, 2008). Elles firent l'hypothèse que cette altération serait liée au déficit de représentation des mots écrits stockés dans le lexique mental des sujets dyslexiques : lors du traitement d'un mot écrit, ces derniers n'auraient pas de représentations assez précises pour comparer leur réponse à la réponse correcte, ils seraient donc en difficulté pour détecter une erreur (Horowitz-Kraus & Breznitz, 2008). Une autre étude, portant sur des mots et des phrases afin de simuler des situations plus naturelles d'exposition au langage écrit, étayait les mêmes résultats (Horowitz-Kraus & Breznitz, 2011a). En contexte non langagier, Van De Voorde et al. (2010) ont également rapporté une réduction de l'onde ERN chez des enfants dyslexiques lors d'une tâche de conflit.

Ces études ont motivé le développement de notre projet, car d'une part l'onde ERN n'a pas été mesurée dans des contextes langagier et non langagier lors d'une même étude, et d'autre part des données en contexte non langagier sont manquantes chez l'adulte dyslexique. Il serait intéressant de répondre à ce manque afin de déterminer si les difficultés de détection de l'erreur dans la dyslexie sont spécifiques au langage écrit ou sont plus globales. Aussi, la proportion d'ébauches d'erreurs, erreurs initiées mais corrigées à temps, relativement aux taux d'erreurs et de bonnes réponses n'a pas été étudiée. Ceci serait intéressant afin de constater quelle part de bonnes réponses sont des erreurs initiées qui ont été évitées grâce aux processus de contrôle.

2.1.2. L'ébauche d'erreur

Des contextes variés, qu'il s'agisse d'activités quotidiennes ou d'épreuves proposées en laboratoire, peuvent influencer sur le nombre d'erreurs commises. C'est le cas lorsqu'un temps est imparti pour accomplir la tâche (e.g., finir un travail rapidement, se préparer le matin dans la précipitation, parler trop vite et réaliser une erreur phonologique, etc.). Classiquement, des tâches manipulant la compatibilité entre stimulus et réponse sont utilisées pour étudier les diverses facettes du contrôle cognitif (contrôle de l'erreur, gestion de l'interférence). Certaines sont des tâches dites de TR de choix, dans lesquelles il est demandé au sujet de répondre le plus rapidement possible, comme lors de la tâche de Simon (Craft & Simon, 1970) illustrée sur la Figure 3.

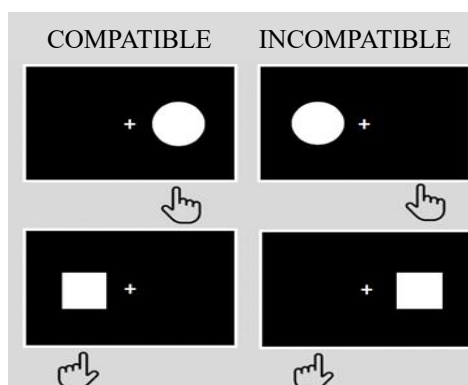


Figure 3. Tâche de Simon (Craft & Simon, 1970), issu de Grisetto et al. (2019), illustrant des essais compatibles et incompatibles.

Dans cette tâche (Figure 3), le sujet doit appuyer à droite (gauche) si le stimulus est un rond (carré). Il peut être face à quatre situations, deux sont dites « compatibles » et deux sont

dites « incompatibles ». L'essai est compatible si le stimulus est localisé du côté ipsilatéral à la réponse requise ; il est dit incompatible s'il est localisé du côté controlatéral à la réponse requise. En moyenne, les sujets sont plus rapides et plus exacts pour les essais compatibles que les essais incompatibles : ce phénomène est un effet d'interférence appelé effet de compatibilité.

Enregistrer l'activité des muscles impliqués dans la tâche de Simon (Craft & Simon, 1970), les muscles courts fléchisseurs des pouces, avec l'électromyographie (EMG) de surface via deux électrodes (Figure 4A), permet de quantifier l'énergie musculaire nécessaire (Criswell, 2010) et de révéler des informations précises sur les réponses déclenchées par les sujets. Bien que la réponse soit binaire (correcte ou incorrecte), l'EMG peut révéler des patrons de réponses plus complexes. Dans environ 10 à 20% des essais corrects, une petite erreur a été initiée, détectée et corrigée à temps avant que la bonne réponse soit fournie. L'EMG permet de révéler ces petites activations, les ébauches d'erreurs, visibles sur la Figure 4B, précédant la réponse attendue (Vidal, 2015). Calculer la fréquence des ébauches d'erreurs parmi les bonnes réponses renseigne sur l'efficacité des processus de contrôle : si la réponse est bonne malgré une activité musculaire (qui, plus intense, aurait abouti en une mauvaise réponse), c'est bien que l'erreur a été initiée, mais détectée et inhibée par les processus de contrôle avant même d'être commise.

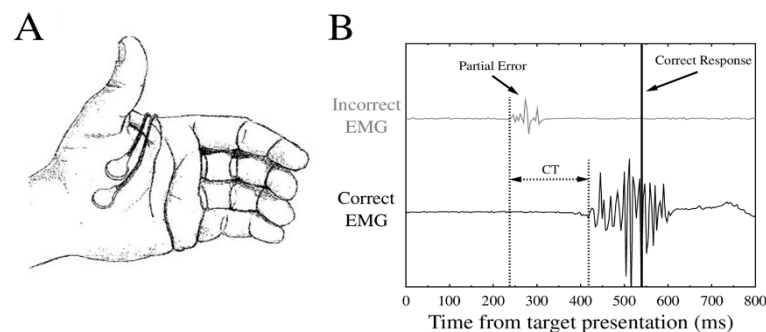


Figure 4. (A) Positionnement des électrodes, sur les muscles courts fléchisseurs des pouces, nécessaire à l'enregistrement des ébauches d'erreurs. (B) Actions musculaires correcte et incorrecte, issu de Roger (2009). Sur le tracé supérieur, ébauche d'erreur enregistrée sur le muscle impliqué dans l'activation incorrecte ; sur le tracé inférieur, activation du muscle impliqué dans la réponse correcte.

2.1.3. La conscience de l'erreur

Lorsqu'une erreur est commise, deux effets ont été relevés en EMG. Tout d'abord, une diminution de l'activité musculaire lors d'une réponse incorrecte témoigne d'une tentative d'inhibition qui a échoué (Vidal, 2015). D'autre part, après une erreur, les sujets répondent moins vite et commettent moins d'erreurs (Vidal, 2015). Ce phénomène de ralentissement post-erreur, étudié pour la première fois par Rabbitt et Rodgers (1977), fait référence à la tendance des participants à prolonger leur TR sur l'essai en cours après avoir commis une erreur sur l'essai précédent. Ce ralentissement témoigne de la détection d'une erreur et de l'ajustement des processus de contrôle en conséquence : ceux-ci œuvrent afin de prévenir une éventuelle nouvelle erreur (Vidal, 2015). L'erreur est ainsi interprétée comme ayant des effets positifs sur les performances ultérieures, rendant le sujet plus attentif et incitant des réponses plus lentes et plus précises dans les essais suivants (Mohamed, 2019). Chez des sujets enfants et adultes atteints de TDAH, une méta-analyse a mis en évidence une réduction du ralentissement post-erreur (Balogh & Czobor, 2016). Ce constat peut s'expliquer par les réponses plus impulsives des personnes atteintes de TDAH, entraînant des réponses plus prématurées, et ce sans investir de temps

supplémentaire dans la prévention de prochaines erreurs (Balogh & Czobor, 2016). Ce phénomène n'a pas été étudié dans la dyslexie.

Bien que le ralentissement post-erreur soit une mesure utile pour étudier l'autorégulation d'un sujet, cette mesure n'est pas suffisante pour mesurer la conscience de l'erreur. En effet, le ralentissement post-erreur implique plusieurs sous-composants cognitifs. Il requiert certes une autosurveillance, permettant de détecter l'erreur ; mais il nécessite aussi une autoadaptation subséquente (Janssen et al., 2020). Si lors d'une étude, le ralentissement post-erreur attendu est moindre, il est alors impossible d'attribuer cette observation à des difficultés de détection ou d'adaptation. Pour cela, les mesures électrophysiologiques du traitement des erreurs, l'onde ERN et les ébauches d'erreurs, s'avèrent utiles pour étudier ces processus de manière plus fine.

Le ralentissement peut être étudié après des erreurs, mais aussi après des ébauches d'erreurs. Dans une étude EEG et EMG proposant une tâche de TR à 18 participants, les auteurs déclarent que 35% des ébauches d'erreurs étaient détectées consciemment par les sujets, et 50% ne l'étaient pas (Ficarella et al., 2019). Par ailleurs, les TR étaient significativement plus lents pour les essais corrects précédés d'une erreur, mais aussi pour les essais corrects précédés d'ébauches d'erreurs détectées (Ficarella et al., 2019). Ces chercheurs ont ainsi rappelé l'existence d'un ralentissement post-erreur, déjà connu dans la littérature (Vidal, 2015), mais ont aussi mis en évidence un ralentissement post-ébauche d'erreur lorsque celle-ci est détectée par le sujet (Ficarella et al., 2019).

Les ralentissements post-erreur et post-ébauche d'erreur restent encore à étudier chez des sujets dyslexiques. Si ces ralentissements sont moins présents, cela pourrait témoigner de processus de contrôle qui ne se réajusteraient pas correctement en comparaison à des normolecteurs.

2.2. L'étude du contrôle cognitif via l'approche chronométrique

2.2.1. Le compromis entre vitesse et précision

Idéalement, lorsque nous sommes confrontés à une tâche chronométrée, nous souhaiterions maximiser nos performances autant en matière de vitesse qu'en matière d'exactitude. Cependant, il est impossible de maintenir ces deux variables à des niveaux élevés : un compromis entre vitesse et précision a donc lieu. Ce compromis est défini par la relation complexe existant entre la volonté de réagir lentement et de commettre relativement le moins d'erreurs possible, par rapport à la volonté de réagir rapidement et de commettre relativement plus d'erreurs (Zimmerman, 2011). Sous-tendant qu'un certain temps est nécessaire pour qu'un individu traite des informations avec précision, ce compromis est souvent utilisé en neuropsychologie pour déterminer la durée minimale nécessaire à la production d'une réponse correcte sur une tâche donnée (Zimmerman, 2011).

Dans une tâche de TR, l'étude du compromis vitesse-précision est un indice du fonctionnement du contrôle inhibiteur, la capacité à retenir ou supprimer volontairement une pensée ou une action (Lyons & Zelazo, 2011). Il s'agit d'un mécanisme cognitif de haut niveau qui, dans une situation nécessitant l'inhibition d'une réponse, suppose un TR plus long et un taux d'exactitude plus bas, comparativement à une situation ne nécessitant pas d'inhibition. Par ailleurs, la consigne donnée au sujet est primordiale : elle a un impact sur la distribution des réponses (Figure 5). Il faut s'assurer que le sujet ne modifie pas sa stratégie au cours de la tâche : il doit obéir à l'impératif de vitesse car « il pourrait ralentir pour faire moins d'erreurs ou réciproquement faire plus d'erreurs pour ne pas ralentir » (del Chiaro, 2013).

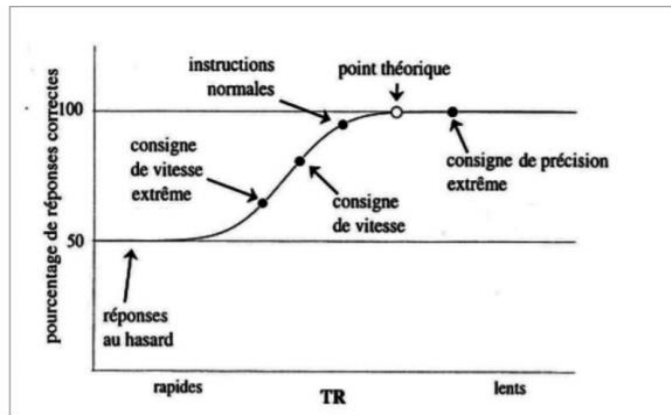


Figure 5. Courbe théorique de compromis vitesse-précision, issu de del Chiaro (2013), illustrant le pourcentage de réponses correctes en fonction du TR.

Une des caractéristiques de la dyslexie étant une lecture lente et inexacte, le compromis entre vitesse et précision suit-il la même dynamique ? Dans une étude visant à comparer le temps de traitement et la précision lors de tâches de lecture chez des sujets dyslexiques et normolecteurs, des chercheuses ont émis l'hypothèse selon laquelle la vitesse de lecture différerait selon que la lecture soit correcte ou incorrecte entre les groupes (Horowitz-Kraus & Breznitz, 2011b). Plusieurs niveaux linguistiques (lettres, mots, phrases) ont été utilisés. Les résultats montrent que les deux groupes ont présenté des TRs plus longs pour les réponses incorrectes que pour les réponses correctes, mais que les sujets dyslexiques étaient significativement plus lents (Horowitz-Kraus & Breznitz, 2011b). Cette lenteur permettrait de soutenir que les erreurs commises dans les deux groupes ne sont pas le fruit d'une impulsivité, d'un manque d'attention ou de réponses au hasard, mais sont plutôt dues à des hésitations, à la recherche de la bonne réponse (Horowitz-Kraus & Breznitz, 2011b). Par ailleurs, les difficultés des sujets dyslexiques concernaient le niveau le plus bas de traitement, celui des lettres (Horowitz-Kraus & Breznitz, 2011b). Les sujets avaient entre 19 et 27 ans, il est possible que les sujets dyslexiques aient compensé leurs difficultés en s'appuyant sur l'environnement graphique et leur compréhension, expliquant pourquoi la lecture de mots ou de phrases était plus efficace.

2.2.2. La force de suppression d'une réponse automatique

L'inhibition d'une mauvaise réponse requiert du temps pour être efficace : sur des TRs très courts, elle ne peut avoir lieu et beaucoup plus d'erreurs sont attendues. Au contraire, pour des TRs très longs, l'inhibition est plus efficace. Dans une tâche de TR comme la tâche de Simon (Craft & Simon, 1970), ceci se manifeste par une diminution de l'effet d'interférence, ici l'effet de compatibilité, lorsque le TR augmente. Cet effet de compatibilité est défini par la différence de TR et/ou d'exactitude entre essais incompatibles et compatibles (del Chiaro, 2013 ; Grandjean, 2020). Vérifier l'hypothèse d'un effet de compatibilité amoindri à mesure que le TR augmente requiert une analyse de distribution (del Chiaro, 2013 ; Grandjean, 2020). Pour cela, la fonction de probabilité ou densité cumulée (probabilité qu'une réponse soit observée pour une valeur donnée) peut être utilisée.

Les expériences peuvent comporter plusieurs conditions d'intérêt. Dans le cas d'une tâche de Simon (Craft & Simon, 1970), il y en a deux : il s'agit des conditions compatibles et incompatibles (Figure 3). Pour visualiser la différence entre deux conditions, il est d'abord nécessaire de tracer les deux fonctions de densité cumulée de chaque condition (Figure 6A), puis de tracer la courbe delta (Figure 6B), qui représente la différence entre les deux tracés précédents. La courbe delta permet d'observer l'allure temporelle de l'effet d'interférence : elle décroît avec

le temps, car les TRs des essais compatibles et incompatibles tendent à être identiques à mesure que le temps augmente (del Chiaro, 2013 ; Grandjean, 2020). La pente visible sur la Figure 6B est révélatrice de la force de la suppression ou de l'inhibition de la réponse automatique (del Chiaro, 2013 ; Grandjean, 2020). Lorsque la pente diminue avec le TR, ceci évoque une diminution de la force de suppression de la réponse automatique. L'annulation de cet effet, nécessitant au moins 250 ms (Simon et al., 1976) pour être efficace, s'explique par le modèle de la double route (De Jong et al., 1994). Ce modèle dépeint deux voies de préparation de réponse parallèles (De Jong et al., 1994), une voie dite indirecte et une voie dite directe. Dans la voie indirecte, la réponse appropriée est sélectionnée grâce au contrôle cognitif supérieur (processus top-down). La voie directe, plus rapide, active automatiquement une réponse correspondant à la position du stimulus. Si la position du stimulus est conforme à la réponse (essai compatible), la réponse correcte est amorcée et, par conséquent, son exécution est facilitée. Si la position et la réponse du stimulus ne sont pas conformes, les deux voies activent des réponses contradictoires. L'amorçage de la réponse via la route directe interfère avec la sélection de la réponse dans la route indirecte et la résolution de ce conflit prolonge le TR (Stürmer et al., 2005).

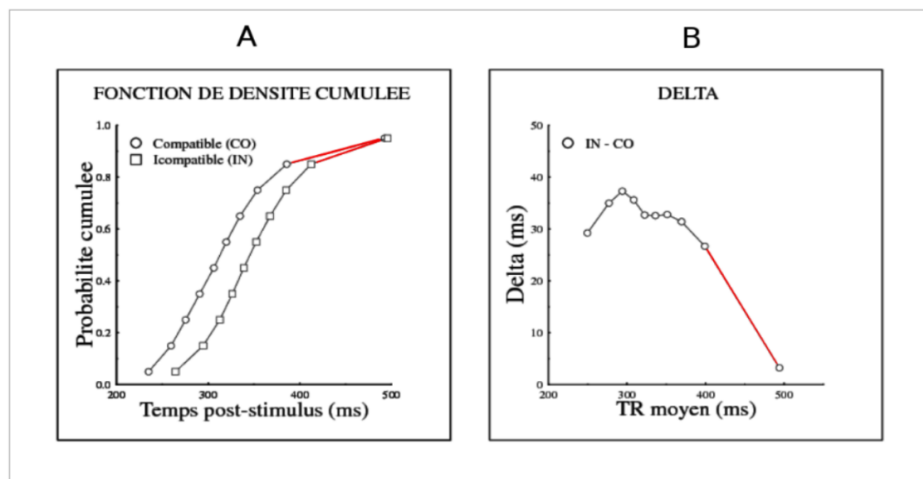


Figure 6. Figure issue de del Chiaro (2013) illustrant (A) la probabilité cumulée d’une réponse correcte en fonction du TR, pour les conditions compatibles et incompatibles. Les derniers segments (en rouge) montrent une convergence des distributions. (B) Différence de ces distributions (courbe delta). Le segment décroissant rouge traduit la différence entre les deux segments rouges convergeant en (A).

2.2.3. La force d’activation d’une réponse automatique

Les mécanismes d’inhibition peuvent aussi être étudiés grâce à la fonction de précision conditionnelle ou Conditional Accuracy Function (CAF), qui intègre à l’analyse l’ensemble des données, qu’il s’agisse de réponses correctes ou incorrectes. L’intérêt est d’observer la tendance à commettre une erreur en fonction du TR, selon les conditions compatibles ou incompatibles pour une tâche de Simon (Craft & Simon, 1970), au lieu de comparer uniquement des taux moyens d’erreurs pour chaque condition (del Chiaro, 2013).

Tout comme pour le tracé de courbes delta, les réponses, correctes et incorrectes cette fois-ci, sont ordonnées selon le TR, puis divisées en quantiles pour chaque condition expérimentale. Pour chaque quantile, le taux moyen de réponses correctes (ou de précision) ainsi que le TR moyen sont calculés. Deux représentations graphiques, une pour chaque condition, sont alors obtenues, différant principalement pour les TRs les plus courts comme l’illustre la Figure 7 : la probabilité de fournir une réponse erronée et rapide dans une situation compatible est très faible en comparaison à une situation incompatible (del Chiaro, 2013 ; Grandjean, 2020).

Ceci est caractéristique de la propension à réagir impulsivement, automatiquement, pour les essais incompatibles traités rapidement. En effet, une impulsivité plus forte sur des essais incompatibles s'observe par une augmentation de la proportion d'erreurs rapides car moins de temps est disponible pour contrer une activation incorrecte (Van Den Wildenberg et al., 2010). Il s'agit de la force de l'activation d'une réponse automatique, diminuant à mesure que le TR augmente. Le premier segment visible sur la représentation graphique des essais incompatibles (Figure 7) est révélateur de cette force d'activation de la réponse automatique, il s'agit du moment où la force est la plus prégnante (del Chiaro, 2013 ; Grandjean, 2020).

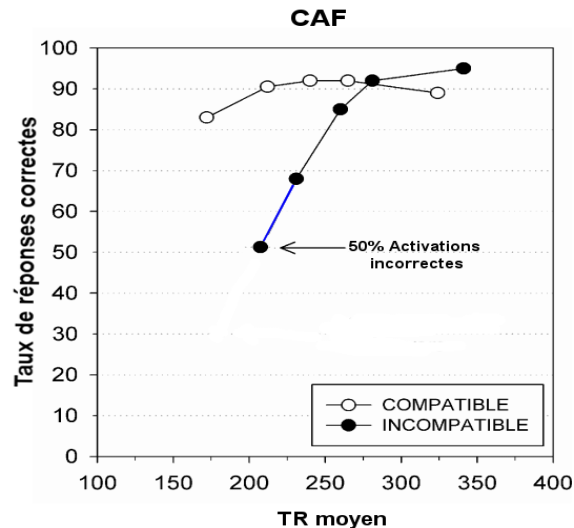


Figure 7. Figure issue de del Chiaro (2013) représentant le taux de réponses correctes (précision) en fonction du TR moyen. Le segment bleu est révélateur de la plus grande force d'activation d'une réponse automatique (Grandjean, 2020).

Dans l'un des chapitres expérimentaux de sa thèse, Grandjean (2020) a voulu déterminer si les forces d'activation et de suppression d'une réponse automatique différaient entre sujets avec TDAH et sujets normo-typiques. Pour cela, une expérience auprès d'enfants avec TDAH (sans traitement pharmacologique) et d'enfants contrôles a été menée sur une tâche de Simon (Craft & Simon, 1970). L'analyse des courbes CAF et des courbes delta a suggéré respectivement que les enfants TDAH présentaient une plus grande propension aux réponses automatiques mais aussi des difficultés à les supprimer (Grandjean, 2020). Nous souhaitons explorer ces mécanismes chez le sujet dyslexique en utilisant également les courbes CAF et les courbes delta.

Problématique, buts et hypothèses

1. Situation initiale

Chez le sujet dyslexique, rencontrant des difficultés de précision et de vitesse de reconnaissance des mots écrits, une réduction de l'amplitude de l'onde ERN par rapport à des lecteurs experts, suggérant un déficit de la détection des erreurs lors d'une tâche de reconnaissance visuelle de mots, est rapportée (Horowitz-Kraus & Breznitz, 2008). Cependant, cette étude n'incluait pas de mesures électromyographiques. Ainsi, d'autres indices du contrôle cognitif, comme la proportion d'ébauches d'erreurs relativement aux taux d'erreurs et de bonnes réponses, permettant d'analyser la capacité à corriger des erreurs détectées, n'ont pas été étudiés. D'autre part, Horowitz-Kraus et Breznitz n'ont mesuré l'activité EEG qu'en présence de matériel langagier. Or, les mots et pseudomots inclus dans une tâche de décision lexicale sont particulièrement difficiles à traiter pour des sujets dyslexiques. Il apparaît donc nécessaire

d'étudier les capacités de contrôle cognitif y compris sur une tâche non langagière, afin de spécifier l'atteinte retrouvée chez les sujets adultes dyslexiques.

L'objectif principal de l'étude était donc de déterminer si des adultes dyslexiques avaient des difficultés de contrôle cognitif, plus précisément de détection et de correction de l'erreur, dans des contextes langagier et non langagier en comparaison à des sujets normolecteurs. Pour cela, nous avons proposé deux tâches à des sujets dyslexiques et des sujets normolecteurs. La première tâche était une tâche langagière de décision lexicale de mots et pseudomots, et la seconde était une tâche non langagière de conflit visuo-spatial, la tâche de Simon (Craft & Simon, 1970).

Au vu de l'apport que pouvait constituer l'analyse des ébauches d'erreurs relativement aux taux d'erreurs et de bonnes réponses pour la compréhension des mécanismes de contrôle cognitif, il était prévu d'inclure ces mesures d'intérêt dans notre étude. Si une diminution du pourcentage d'ébauches d'erreurs et une augmentation du taux d'erreurs étaient retrouvés chez les sujets dyslexiques comparativement aux normolecteurs dans les deux tâches, ceci aurait supporté un déficit de correction des erreurs par rapport au groupe contrôle. Par ailleurs, une réduction de l'amplitude de l'onde ERN chez les sujets dyslexiques par rapport au groupe contrôle aurait évoqué une altération de la détection des erreurs. Concernant la spécificité du défaut de détection de l'erreur, si des pourcentages d'ébauches d'erreurs diminués, des taux d'erreurs augmentés ainsi que des amplitudes d'onde ERN réduites étaient retrouvés chez les sujets dyslexiques uniquement sur la tâche langagière, alors l'atteinte des processus de contrôle n'aurait concerné que le traitement du langage écrit. Au contraire, un déficit retrouvé aussi dans la tâche non langagière aurait suggéré un déficit général des processus de contrôle, qui pourrait contribuer aux difficultés de lecture des personnes dyslexiques. Cependant, en raison de la situation sanitaire et d'un manque de participants, les données EEG et EMG n'ont pu être analysées.

2. Enrichissement de la problématique

En raison de la situation sanitaire, seules les données comportementales pouvaient faire l'objet d'une analyse fine. Une sous-problématique du projet a donc été de trouver de nouvelles perspectives d'analyse, qui soient cohérentes avec notre démarche déjà lancée, qui puissent se coupler à une analyse ultérieure des données EEG et EMG.

Ainsi, au lieu d'étudier la détection et la correction de l'erreur grâce à l'EEG et l'EMG, nous nous sommes intéressées à un autre aspect du contrôle cognitif, le contrôle de l'interférence, qu'il est possible d'appréhender grâce aux taux d'erreurs et TRs distribués. Etudier ce contrôle de l'interférence (ici, l'effet de compatibilité) chez les sujets dyslexiques nous permettrait d'observer la dynamique temporelle des erreurs qu'ils font. En effet, les sujets dyslexiques font plus d'erreurs de lecture que des normolecteurs, mais leurs erreurs sont-elles pareillement distribuées en fonction des TRs que chez les normolecteurs ? Pour répondre à cette question, nous nous sommes inspirées des travaux de Grandjean (2020) menés auprès de sujets avec TDAH : il s'est avéré que ceux-ci avaient un défaut de contrôle de l'interférence lors d'une tâche de Simon (Craft & Simon, 1970), concernant les forces d'activation et de suppression d'une réponse automatique. Les sujets dyslexiques pourraient-ils présenter les mêmes tendances que les sujets TDAH, concernant l'une ou l'autre des deux forces ? Si un déficit général du contrôle de l'interférence est retrouvé, celui-ci pourrait contribuer aux difficultés de lecture des personnes dyslexiques. Par ailleurs, si un déficit est observé, celui-ci pourra être précisé par une analyse ultérieure des données EEG et EMG.

Méthode

1. Population

Via des affiches posées à l'université de Lille, nous voulions constituer un groupe de normolecteurs et un groupe de sujets dyslexiques, appariés sur le niveau d'intelligence verbale, l'âge, le genre, le niveau d'études et le niveau socio-économique. Chaque groupe devait comporter 30 participants, âgés de 18 à 40 ans. A ce jour, seules les données de six sujets dyslexiques et de sept normolecteurs ont été récoltées. Les participants dyslexiques étaient âgés en moyenne de 23,50 ans ($ET = 1,52$) et les participants normolecteurs de 20,83 ans ($ET = 1,47$).

Les volontaires devaient être droitiers, n'avoir jamais souffert d'un trouble psychiatrique ou neurologique, d'un TDAH ou d'un trouble du langage oral. Les sujets devaient avoir une vision normale ou corrigée et avoir pour langue maternelle le français. Enfin, ils ne devaient pas avoir consommé d'alcool ou de stupéfiants la nuit précédant la participation à l'expérience.

Concernant les sujets dyslexiques, ceux-ci devaient avoir reçu un diagnostic de dyslexie durant l'enfance, ne pas suivre de rééducation du langage écrit au moment de la réalisation de l'étude, et ne présenter aucun autre trouble des apprentissages. Concernant les sujets normolecteurs, aucun ne devait présenter d'antécédents de difficultés d'apprentissage de la lecture. Afin d'inclure à l'étude uniquement des sujets répondant aux critères d'inclusion et ne présentant pas l'un des critères d'exclusion susmentionnés, un questionnaire (Annexe 1) devait être rempli par tous les participants. Avant de participer à l'étude, les sujets devaient avoir rempli une lettre d'information (Annexe 2) ainsi qu'un formulaire de consentement (Annexe 3).

Toutes les données récoltées auprès des volontaires ont été anonymisées en leur attribuant un code de participation. Le nom et le prénom du sujet ne figuraient en entier qu'uniquement sur la lettre d'information et le formulaire de consentement signés, ces documents étant archivés dans un lieu protégé et distinct du lieu de stockage de toutes les données enregistrées ultérieurement durant l'expérience. Les sujets participaient ensuite à une étude en deux parties, approuvée par le comité d'éthique universitaire de Lille (2017-7-S55). À la fin de la session expérimentale, les participants pouvaient poser autant de questions qu'ils le souhaitaient aux expérimentateurs.

2. Matériel

2.1. Tâches pré-expérimentales

Avant de participer aux épreuves pré-expérimentales, les sujets devaient répondre au questionnaire BIS/BAS (Carver & White, 1994) adapté en version française (Caci et al., 2007) figurant en Annexe 4, afin de déceler des difficultés d'inhibition. Les sujets devaient aussi répondre au questionnaire BIS-11 (Patton et al., 1995) figurant en Annexe 5, afin d'informer les expérimentateurs sur une potentielle impulsivité.

La partie pré-expérimentale (30 minutes) a été proposée afin d'apparier les groupes de sujets dyslexiques et normolecteurs sur le niveau d'intelligence non-verbale à l'aide de la version courte des matrices de Raven (Raven et al., 1998). De plus, chaque sujet devait répondre au questionnaire de lecture ARHQ (Lefly & Pennington, 2000), permettant de décrire son rapport à la lecture. Ensuite, tirées de l'Ecla16+ (Gola-Asmussen et al., 2010) étaient administrées des épreuves chronométrées : une lecture du texte de l'Alouette (Lefavrais, 1965), une lecture de mots réguliers, irréguliers et de pseudomots, une épreuve de suppression phonémique ainsi qu'une épreuve de dénomination rapide d'images et de lettres étaient proposées.

2.2. Tâches expérimentales

Dans un second temps, les sujets participaient à la partie expérimentale, composée de deux tâches, une tâche langagière et une tâche non langagière. Durant ces tâches, des mesures comportementales (erreurs et bonnes réponses, TR) étaient récoltées ainsi que des mesures électroencéphalographiques (EEG) et électromyographiques (EMG), enregistrées grâce au système Biosemi. Les mesures EMG, permettant de déceler les ébauches d'erreurs, étaient enregistrées à l'aide de deux électrodes posées sur le pouce gauche et le pouce droit, au niveau des muscles fléchisseurs du pouce (Figure 4A). L'enregistrement EEG, permettant de mesurer l'onde ERN, était réalisé par 64 électrodes fixées sur un bonnet, placées selon le système international 10-20. La moitié des sujets a effectué en premier la tâche langagière ; l'autre moitié des sujets a effectué en premier la tâche non langagière.

2.2.1. Tâche langagière (décision lexicale)

La tâche langagière proposée aux participants était une tâche de décision lexicale pour laquelle 500 mots ont été sélectionnés à partir de la base Lexique 3 (New et al., 2001). À partir de ces mots, 500 pseudomots ont été créés et appariés avec les mots selon leur longueur, la fréquence des lettres, la fréquence des bigrammes et des trigrammes, ainsi que selon le voisinage orthographique et phonologique. La comparaison de ces critères entre mots et pseudomots est renseignée en Annexe 6.

Concernant le déroulement de la tâche, le sujet devait indiquer le plus rapidement et le plus précisément possible si un stimulus apparaissant sur un écran était un mot ou un pseudomot. La tâche durait 50 minutes et était répartie en 4 blocs suivis d'un temps de pause. Elle était précédée d'un entraînement afin de s'assurer de la compréhension des consignes par le participant. Chaque essai se déroulait de la manière suivante. Au début de chaque essai, une croix de fixation était présentée pendant 400 ms, suivie d'un écran blanc pendant 100 ms puis de l'apparition d'un stimulus pendant 1000 ms. Le sujet devait fournir sa réponse, suivie d'un intervalle inter-essai de 1400 ms. La moitié des participants avait pour consigne d'appuyer à droite lors de l'affichage d'un pseudomot et à gauche lors de l'affichage d'un mot ; l'autre moitié avait reçu la consigne inverse.

2.2.2. Tâche non langagière de Simon (Craft & Simon, 1970)

La tâche non langagière était une tâche inspirée de la tâche de Simon de Craft et Simon (1970). Un rond ou un carré apparaissait à gauche ou à droite de l'écran, le sujet devait appuyer à droite ou à gauche selon la consigne donnée.

Concernant le déroulement de la tâche, selon la localisation du stimulus sur l'écran, le sujet était face à une condition compatible ou incompatible, illustrées sur la Figure 3. La première situation impliquait une présentation du stimulus du côté de la main nécessaire à la réponse attendue ; la seconde impliquait une présentation du stimulus du côté opposé. Le sujet devait répondre le plus rapidement et le plus précisément possible. La tâche durait 30 minutes et était répartie en 5 blocs (de 100 essais) suivis d'un temps de pause. Elle était précédée d'un entraînement afin de s'assurer de la compréhension des consignes par le participant. Au début de chaque essai, une croix de fixation était présentée pendant 300 ms, suivie de la présentation de l'item pendant 1000 ms, puis, après la réponse du sujet, d'un délai inter-essai de 1000 ms. La moitié des participants avait pour consigne d'appuyer à droite lorsque le stimulus était un rond et d'appuyer à gauche lorsque le stimulus était un carré ; l'autre moitié des participants avait reçu les consignes inverses.

3. Procédure d'analyse

3.1. Tâches pré-expérimentales

L'analyse des données récoltées durant la partie pré-expérimentale de l'expérience pouvait amener à l'exclusion de certains participants des analyses. Les sujets pouvaient être exclus s'ils obtenaient un score inférieur au 50^{ème} percentile en intelligence non verbale. Les sujets du groupe contrôle pouvaient être exclus s'ils obtenaient des scores situés à plus de 1,50 ET en-dessous de la moyenne du groupe contrôle en lecture.

L'intérêt de la partie pré-expérimentale résidait dans la constitution de deux échantillons représentatifs d'une population dyslexique et d'une population normolectrice. Pour cela, il était nécessaire de comparer les populations. En raison des petits effectifs disponibles ($n < 30$), il était impossible de comparer les groupes immédiatement avec un test de Student. Pour pallier cette petite taille, il était toutefois possible de vérifier l'hypothèse de normalité des variables à l'aide d'un test de normalité de Shapiro-Wilk, choisi pour sa puissance concernant les petits effectifs ($n \leq 50$). Par la suite, le test de Student a pu être appliqué.

3.2. Tâches expérimentales

3.2.1. Analyse générale des données

Concernant les deux tâches, les moyennes et écarts-types des mesures comportementales générales (TRs, pourcentages d'erreurs) des sujets dyslexiques et normolecteurs ont été calculés. Les effets de lexicalité, soit la différence entre le TR moyen et/ou les taux d'erreurs des pseudomots et des mots, ont été calculés pour la tâche de décision lexicale. Les effets de compatibilité ont également été calculés pour la tâche de Simon. Puis, le test de Wilcoxon-Mann-Whitney a été appliqué. Il s'agit d'un test non paramétrique permettant de comparer des échantillons indépendants de petite taille.

3.2.2. Analyse distributive des données

Pour chaque tâche et pour chaque sujet, les coordonnées des courbes CAF et des courbes delta devaient être tracées. Pour cela, devant la quantité de données à traiter, le langage de programmation R et le logiciel libre (R Core Team, 2021) du même nom ont été employés.

Concernant les courbes CAF, pour chaque sujet, les réponses correctes et incorrectes ont été ordonnées selon le TR, puis divisées en cinq quantiles pour chaque condition expérimentale (compatible, incompatible, mot et pseudomot). Pour chaque quantile, le taux moyen de réponses correctes (ou précision) ainsi que le TR moyen ont été calculés. Pour chaque sujet et chaque tâche, deux représentations graphiques, une pour chaque condition, ont alors été obtenues. Les courbes moyennes par groupe ont ensuite été tracées. La pente du premier segment d'une condition incompatible est révélatrice de la force de l'activation de la réponse automatique (del Chiaro, 2013 ; Grandjean, 2020). En supposant que la pente de ce segment pour la condition pseudomot puisse aussi être révélatrice de la force de l'activation de la réponse automatique, les pentes ont été comparées entre groupes et tâches à l'aide du test non paramétrique de Wilcoxon-Mann-Whitney. Par ailleurs, les représentations visuelles générales des groupes dyslexique et normolecteur, faites à partir des moyennes des coordonnées pour chaque sujet, ont été générées.

Concernant les courbes delta, la fonction de probabilité ou densité cumulée (probabilité qu'une réponse soit observée pour une valeur donnée) a été utilisée. Pour chaque sujet, les TRs pour les essais corrects ont été ordonnés temporellement puis distribués en cinq quantiles. La moyenne des TRs a ensuite été calculée pour chacun de ces quantiles. Ceci a été effectué pour

chaque condition expérimentale (compatible, incompatible, mot et pseudomot). Pour visualiser la différence entre deux conditions, il était nécessaire de tracer les deux fonctions de densité cumulée de chaque condition, puis de tracer la courbe delta représentant la différence de celles-ci. La pente de la courbe delta permet d'observer l'allure temporelle de l'effet d'interférence : plus la pente du dernier segment est basse, plus elle révèle une force de suppression de la réponse automatique importante sur une tâche de Simon (del Chiaro, 2013 ; Grandjean, 2020). En supposant que la pente du dernier segment obtenue pour une tâche de décision lexicale puisse aussi être révélatrice de la force de l'activation de la réponse automatique, les pentes ont été comparées entre groupes et entre tâches à l'aide du test de Wilcoxon-Mann-Whitney. Par ailleurs, les représentations visuelles générales de chaque groupe, faites à partir des moyennes des coordonnées pour chaque sujet, ont été tracées.

Résultats

1. Tâches pré-expérimentales : constitution des groupes

L'analyse des données des tâches pré-expérimentales (Tableau 1) permettait l'appariement des groupes, l'un représentatif d'une population dyslexique et l'autre d'une population normolectrice. Treize volontaires ont participé à l'étude. Six participants ont pu être inclus dans le groupe des dyslexiques et sept participants ont pu être inclus dans le groupe des normolecteurs.

Tableau 1. Moyennes des âges et des scores des tâches pré-expérimentales pour les sujets dyslexiques et pour les normolecteurs, test de normalité et comparaison entre les groupes.

Mesures	Dyslexiques Moyenne (ET)	Normolecteurs Moyenne (ET)	Test de Shapiro- Wilk	Test de Student
Age	23, 50 (1,52)	20,83 (1,47)	**	*
Alouette (temps de lecture en s)	137,43 (26,74)	87,62 (12,78)	**	**
Alouette NMCL (/265)	255,00 (5,55)	262,50 (1,52)	*	**
Alouette (CTL)	345,22 (71,41)	548,32 (75,04)	**	***
Alouette (erreurs)	10,00 (5,50)	2,50 (1,52)	*	**
Délétion de phonèmes (/10)	7,67 (1,51)	9,67 (0,52)	ns ¹	
Délétion phonèmes (TR en s)	46,49 (18,42)	30,39 (4,95)	**	*
Dénomination de lettres (/50)	47,83 (2,79)	49,33 (0,82)	ns ¹	
Dénomination de lettres (en s)	27,07 (9,07)	15,04 (3,54)	**	*
Dénomination d'images (/60)	60 (0)	60 (0)	NaN ¹	
Dénomination d'images (en s)	49,34 (7,75)	37,99 (4,49)	**	*
PM38 (score doublé)	51,67 (2,94)	55,33 (3,27)	**	ns
PM38 (rang centile)	91,67 (4,08)	94,17 (2,04)	ns	

Note. ET : écart-type ; TR : temps de réponse (s) ; NMCL : nombre de mots correctement lus ; CTL : score d'efficacité de la lecture ; ns : non significatif ; * = $p < 0.05$; ** = $p < 0.01$; *** = $p < 0.001$; NaN : opération invalide ; ¹ Effet plafond.

Pour composer les groupes, les données ont d'abord été soumises à un test de Shapiro-Wilk, pour confirmer l'hypothèse de normalité des variables testées et ainsi négliger la condition d'effectifs $n \geq 30$ pour l'application d'un test de Student. Ce traitement a mis en avant des différences significatives et non significatives entre les groupes (Tableau 1).

L'hypothèse de normalité a été vérifiée, sauf pour les épreuves de délétion de phonèmes, de dénomination de lettres et d'images pour lesquelles il existait un effet plafond, d'autant plus marqué chez les normolecteurs concernant la dénomination de lettres et la délétion de phonèmes. Le test de Student a montré des différences significatives ($p < 0.01$) entre les deux groupes concernant tous les scores obtenus à l'Alouette (Lefavrais, 1965), avec un indice CTL très différent ($p < 0.001$), les normolecteurs étant plus rapides et plus exacts que les sujets dyslexiques. Les normolecteurs étaient également significativement plus rapides ($p < 0.05$) que les sujets dyslexiques aux épreuves de délétion de phonèmes, de dénomination de lettres et d'images. Par ailleurs, aucune différence significative entre les deux groupes concernant l'intelligence non verbale n'a été relevée. Ces différences significatives et non significatives correspondaient aux résultats souhaités.

2. Tâches expérimentales

2.1. Analyse générale des données

2.1.1. Tâche de décision lexicale

Les données comportementales recueillies à la tâche de décision lexicale ont été analysées à l'aide du test de Wilcoxon-Mann-Whitney. Les moyennes et écart-types de chaque variable pour chacun des deux groupes ont été calculées. Le Tableau 2 regroupe et compare pour les deux groupes les TRs pour les mots et pseudomots, lorsque ceux-ci étaient correctement identifiés ou non, et les taux d'erreurs pour les mots et pseudomots. Les effets de lexicalité portant sur les latences des réponses correctes et sur l'exactitude ont également été calculés.

Tableau 2. Moyennes et écarts-types des mesures comportementales des sujets dyslexiques et des normolecteurs à la tâche de décision lexicale, comparaison entre les groupes.

Mesures	Dyslexiques Moyennes (ET)	Normolecteurs Moyennes (ET)	<i>p</i>
TR MC (ms)	753,37 (90,05)	632,93 (78,22)	*
TR MI (ms)	798,28 (65,37)	635,23 (83,88)	**
TR PMC (ms)	842,70 (76,17)	671,99 (77,77)	**
TR PMI (ms)	840,39 (79,26)	648,22 (101,62)	**
Effet de lexicalité (TR PMC – TR MC) en ms	89,33 (36,99)	39,06 (30,74)	*
Ralentissement post-erreur (ms)	56,69 (82,27)	49,99 (39,24)	<i>ns</i>
% erreurs M	8,75 (4,14)	6,77 (4,21)	<i>ns</i>
% erreurs PM	9,92 (5,45)	4,78 (2,36)	<i>ns</i>
Effet de lexicalité (% erreurs PM - % erreurs M)	1,17 (3,97)	-1,99 (2,74)	<i>ns</i>

Note. ET : écart-type ; MC : mots corrects ; MI : mots incorrects ; PMC : pseudomots corrects ; PMI : pseudomots incorrects ; M : mots ; PM : pseudomots ; *ns* : non significatif ; * = $p < 0.05$; ** = $p < 0.01$.

Concernant les TRs, des différences significatives ont été relevées entre les groupes. Les sujets dyslexiques étaient significativement plus lents que les normolecteurs ($p < 0.05$) comme l'indique le Tableau 2, et ce, indifféremment du type de stimulus (mots versus pseudomots) et de l'exactitude des réponses fournies (correcte versus incorrecte). Par ailleurs, les TRs pour les essais corrects ont montré un effet de lexicalité chez les deux groupes. Cet effet de lexicalité était plus grand chez les sujets dyslexiques que chez les normolecteurs ($p < 0.05$). En revanche, il n'y a pas eu de différence significative entre les groupes concernant le ralentissement post-erreur.

Concernant les taux d'erreurs, les différences n'étaient pas significatives. Les taux d'erreurs indiquaient par ailleurs un effet de lexicalité sur le pourcentage d'erreurs chez les sujets dyslexiques, mais pas chez les normolecteurs pour qui l'inverse s'est produit. Toutefois, cet effet de lexicalité n'était pas significativement différent d'un groupe à l'autre.

2.1.2. Tâche de Simon (Craft & Simon, 1970)

Les données comportementales recueillies dans la tâche de Simon (Craft & Simon, 1970) ont été analysées à l'aide du test de Wilcoxon-Mann-Whitney. Les moyennes et écarts-types de chaque variable pour chacun des deux groupes ont été calculés. Le Tableau 3 regroupe et compare ainsi pour les deux groupes les TRs pour les essais corrects, les essais compatibles corrects, les essais incompatibles corrects et les essais incorrects. Les taux d'erreurs pour les essais compatibles et incompatibles ont été calculés. Enfin, les effets de compatibilité portant sur les latences des réponses correctes et sur l'exactitude ont également été calculés.

Tableau 3. Moyennes et écarts-types des mesures comportementales des sujets dyslexiques et des normolecteurs dans la tâche de Simon, comparaison entre les groupes.

Mesures	Dyslexiques Moyennes (ET)	Normolecteurs Moyennes (ET)	<i>p</i>
TR C (ms)	505,92 (46,72)	448,68 (38,64)	<i>ns</i>
TR compC (ms)	489,08 (48,40)	436,32 (34,97)	<i>ns</i>
TR incC (ms)	523,24 (45,72)	461,38 (43,89)	*
TR I (ms)	416,06 (49,81)	390,95 (38,82)	<i>ns</i>
Effet de compatibilité (TR incC – TR compC) en ms	34,17 (11,48)	25,06 (17,47)	<i>ns</i>
Ralentissement post-erreur (ms)	44,11 (32,99)	28,18 (12,20)	<i>ns</i>
% erreur global	4,24 (1,20)	5,40 (2,81)	<i>ns</i>
% erreurs compI	3,18 (1,47)	4,08 (1,89)	<i>ns</i>
% erreurs incI	5,37 (1,48)	6,82 (3,88)	<i>ns</i>
Effet de compatibilité (% erreurs incI - % erreurs compI)	2,20 (1,68)	2,74 (2,30)	<i>ns</i>

Note. ET : écart-type ; compC : essais compatibles corrects ; compI : essais compatibles incorrects ; incC : essais incompatibles corrects ; incI : essais incompatibles incorrects ; *ns* : non significatif ; * = $p < 0.05$.

Concernant tous les TRs, les sujets dyslexiques étaient toujours plus lents que les normolecteurs, mais seule la différence de TR aux essais incompatibles corrects était significative ($p < 0.05$) comme l'indique le Tableau 3. Dans les deux groupes, des effets de compatibilité sur les TRs et

sur les erreurs ainsi que des ralentissements post-erreurs ont été relevés. Cependant, aucun de ces résultats n'était significativement différent d'un groupe à l'autre.

2.2. Analyse distributive des données

2.2.1. Force d'activation de la réponse automatique (CAF)

Afin d'analyser la dynamique des effets de lexicalité et de compatibilité chez les sujets dyslexiques comparativement aux normolecteurs dans des contextes de traitement langagier écrit et non langagier, les courbes de fonction de précision conditionnelle (CAF) représentant la précision en fonction des TRs moyens de cinq quantiles (de Q1 à Q5) ont été tracées, pour chaque sujet et dans les quatre conditions des deux tâches (compatible, incompatible, mot, pseudomot). Les données numériques distribuées par quantile via le logiciel R (R Core Team, 2021) ayant permis de tracer ces courbes ainsi que les représentations graphiques obtenues pour chaque sujet se trouvent respectivement en Annexes 7 et 8. Afin d'observer la tendance pour chaque groupe, les moyennes ont été calculées et sont présentées dans la Figure 8.

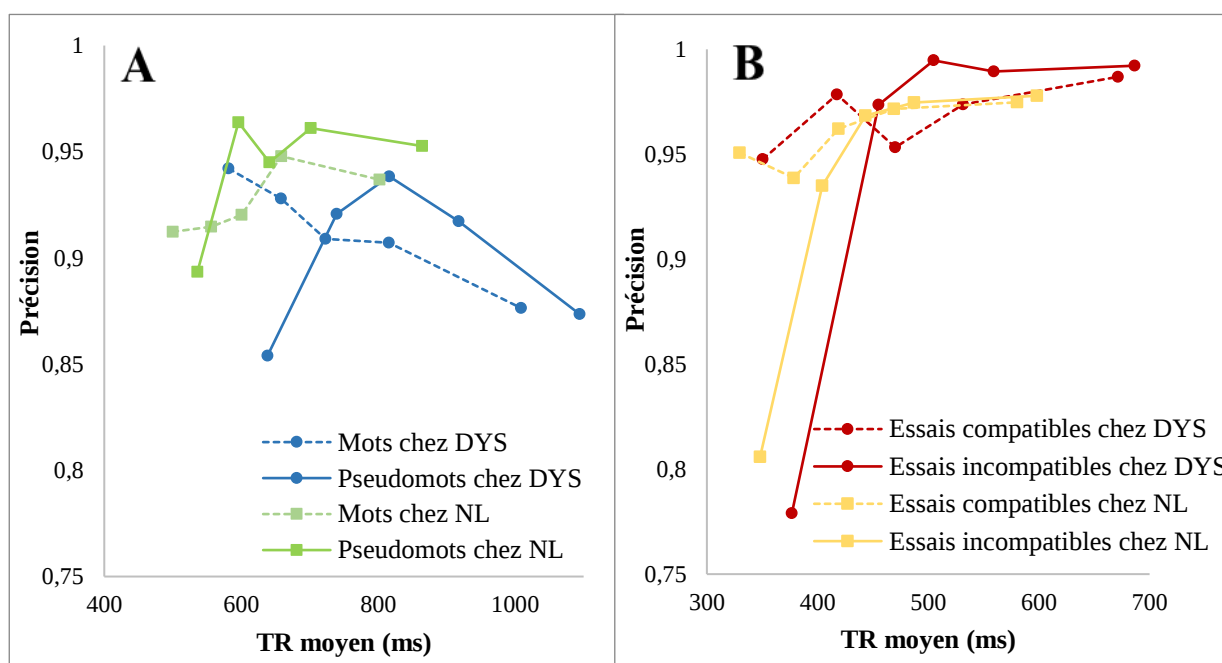


Figure 8. Courbes de fonction de précision conditionnelle (Conditional Accuracy Function), représentant la précision (exactitude) en fonction du TR moyen de chaque quantile, pour (A) la tâche de décision lexicale et (B) la tâche de Simon (Craft & Simon, 1970), chez les sujets normolecteurs (NL) et dyslexiques (DYS). Chaque ligne brisée est segmentée au moyen de cinq quantiles, distribuant les essais en essais rapides (Q1 et Q2), intermédiaires (Q3) et lents (Q4 et Q5). Le premier point (quantile) correspond à la précision observée pour la moyenne des TRs des premiers 20% d'essais lorsque les temps sont ordonnés par ordre croissant, soit les plus rapides. Le deuxième point correspond à la précision observée pour la moyenne des TRs des 20% d'essais suivants, moins rapides que les précédents, etc.

2.2.1.1. Tâche de décision lexicale

Concernant la tâche de décision lexicale, la représentation graphique (Figure 8A) suggère d'abord que les sujets dyslexiques ont été plus lents et moins précis que les normolecteurs, ceci étant cohérent avec les résultats non distribués. Cela est observé pour tous les quantiles. Classiquement, les performances s'améliorent pour les quantiles élevés comme le suggère le compromis vitesse-précision (Figure 5) : l'exactitude augmente au détriment de la vitesse. Ce compromis a été observé chez les normolecteurs (Figure 8A) pour la première fois dans une

tâche de décision lexicale manipulant des mots et des pseudomots : consacrer davantage de temps à répondre leur permettait d'améliorer leur exactitude sur les mots et les pseudomots jusqu'au quantile Q4. En revanche, cette amélioration n'était visible chez les sujets dyslexiques que sur les pseudomots : leurs performances sur les mots n'étaient jamais améliorées à mesure de l'allongement de leurs TRs. Par ailleurs, si l'on regarde l'écart présent entre les quantiles des courbes des pseudomots et des mots, l'on remarque un effet de lexicalité plus important chez les sujets dyslexiques que chez les normolecteurs pour les TRs les plus rapides. Aussi, les réponses les plus rapides des dyslexiques concernant les mots semblaient plus exactes que les réponses les plus rapides des normolecteurs. Cependant, pour les deux groupes, un effet plafond sur les performances est observé : une détérioration des performances (courbe en U inversé particulièrement visible chez les sujets dyslexiques) semblait avoir lieu à partir du quantile Q4 pour les normolecteurs pour les deux stimuli et du quantile Q3 pour les sujets dyslexiques pour les pseudomots. Ceci peut s'expliquer par une non reconnaissance du stimulus.

Il a été proposé que le premier segment de la courbe CAF d'une situation incompatible (Figure 7) obtenue à une tâche de Simon (Craft & Simon, 1970) était révélateur de la force d'activation d'une réponse automatique (del Chiaro, 2013 ; Grandjean, 2020). Nous avons supposé que celle-ci pouvait aussi être visible dans une tâche langagière comme la tâche de décision lexicale, sur les pseudomots. La force d'activation de la réponse automatique visible entre les quantiles Q1 et Q2 des pseudomots (Figure 8A) semblait légèrement plus marquée chez les normolecteurs que chez les sujets dyslexiques.

2.2.1.2. Tâche de Simon (Craft & Simon, 1970)

Concernant la tâche de Simon (Craft & Simon, 1970), la Figure 8B affiche des courbes globalement similaires (asymptotes) entre sujets dyslexiques et normolecteurs, bien qu'elles soient logiquement décalées dans le temps : les sujets dyslexiques étaient plus lents, ceci étant cohérent avec les résultats non distribués. Cela est observé pour tous les quantiles, que l'essai soit rapide, intermédiaire ou lent. L'ensemble des sujets avait réalisé environ 20 % d'erreurs concernant les essais incompatibles pour le quantile Q1, soit les plus rapides, et parvenaient à ne commettre plus que 5% d'erreurs lorsque leurs TRs se situaient dans le quantile Q2, soit après un gain d'environ 70 ms. Ceci est évocateur d'une importante force d'activation de la réponse automatique dans les deux groupes. Celle-ci était légèrement plus marquée chez les sujets dyslexiques car leur écart de performance entre le quantile Q1 et le quantile Q2 était plus grand que chez les normolecteurs. La tendance à faire des erreurs était donc légèrement plus grande chez les sujets dyslexiques pour leurs réponses les plus rapides aux essais incompatibles que chez les normolecteurs. D'autre part, les sujets dyslexiques étaient plus performants à partir du quantile Q2 des essais incompatibles (environ 450 ms) que les normolecteurs.

2.2.1.3. Comparaison inter-tâches et inter-groupes

Concernant les deux tâches, les Figures 8A et 8B suggèrent que la force d'activation de la réponse automatique semblait plus marquée dans la tâche de Simon (Craft & Simon, 1970) sur les essais incompatibles que dans la tâche de décision lexicale sur les pseudomots. Pour permettre une comparaison plus fiable, les pentes de chaque premier segment ont été calculées pour chaque sujet et se trouvent en Annexe 9. Un test de Wilcoxon-Mann-Whitney a été appliqué à l'ensemble des pentes afin de les comparer entre tâches et entre groupes. Le résultat de cette analyse ainsi que les pentes moyennes qui ont été calculées figurent dans le Tableau 4.

Tableau 4. Moyennes et écarts-types des pentes du premier segment Q1Q2 des courbes CAF, pour les conditions incompatible et pseudomot, pour les sujets dyslexiques et normolecteurs, comparaisons entre les groupes et entre les tâches.

Mesures	Dyslexiques Moyennes (ET)	Normolecteurs Moyennes (ET)	Comp. entre groupes (<i>p</i>)
Pente Q1Q2 Simon	2,61 (1,17)	2,27 (1,20)	<i>ns</i>
Pente Q1Q2 DL	0,68 (0,69)	1,06 (0,87)	<i>ns</i>
Comp. entre tâches (<i>p</i>)	*	<i>ns</i>	

Note. ET : écart-type ; Q1Q2 : segment d'intérêt dans la mesure de la force d'activation d'une réponse automatique ; Comp. : comparaison ; DL : tâche de décision lexicale ; Simon : tâche de Simon (Craft & Simon, 1970) ; *ns* : non significatif ; * = $p < 0.05$.

Seule une comparaison s'est avérée significative ($p < 0.05$) entre les tâches chez les sujets dyslexiques : la pente était significativement plus raide pour la situation incompatible à la tâche de Simon (Craft & Simon, 1970) que pour la situation pseudomot à la tâche de décision lexicale, suggérant une force d'activation automatique plus importante.

2.2.2. Force de suppression de la réponse automatique (delta)

Afin d'analyser la dynamique des effets de compatibilité et de lexicalité dans les deux groupes, en contexte langagier écrit et non langagier, les courbes de fonction de densité de probabilité cumulée et leurs courbes delta ont été tracées, pour chaque sujet, pour les quatre types de conditions possibles (compatible, incompatible, mot et pseudomot). Les données numériques distribuées par quantile via le logiciel R (R Core Team, 2021) ayant permis de tracer les courbes delta ainsi que les représentations graphiques de chaque sujet se trouvent respectivement en Annexe 10 et en Annexe 11 du mémoire. Pour observer la tendance générale de chaque groupe, les moyennes ont été calculées et ont permis d'obtenir la Figure 9.

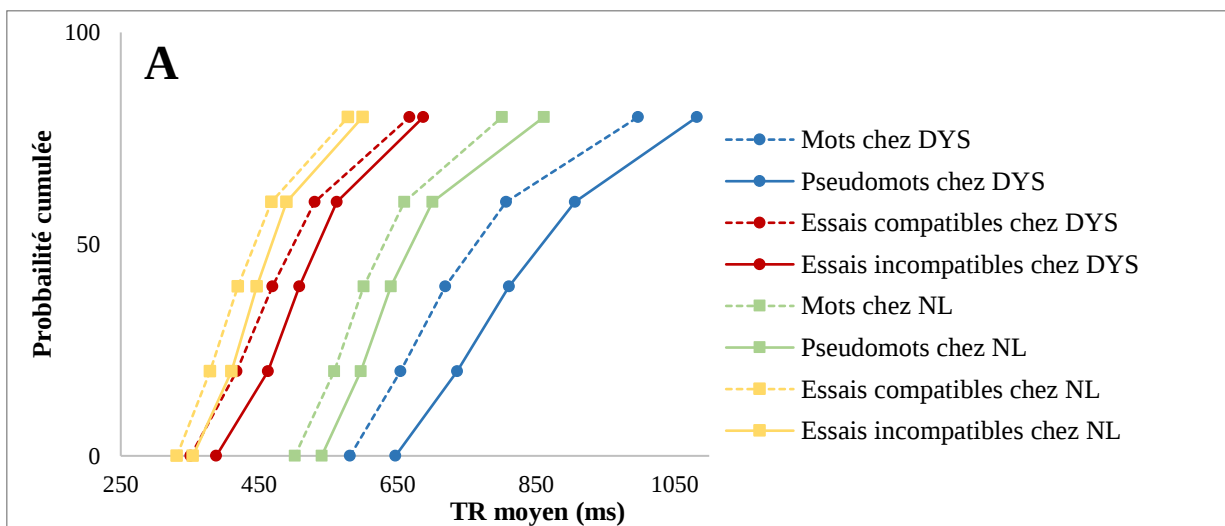


Figure 9. (A) Fonctions de densité de probabilité cumulée pour les deux tâches, les quatre conditions et les deux groupes.

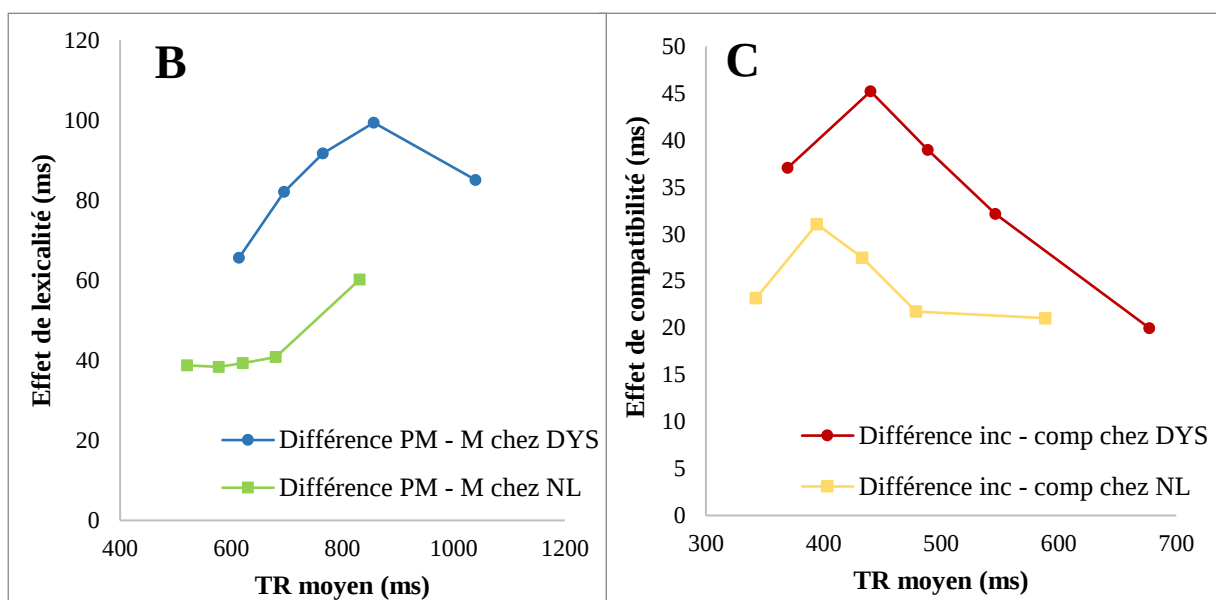


Figure 9. (B) Courbes delta des différences entre les fonctions de densité de probabilité cumulée (figurant sur la Figure 9A) pour les pseudomots (PM) et mots (M). **(C)** Courbes delta des différences entre les fonctions de densité de probabilité cumulée (figurant sur la Figure 9A) pour les essais incompatibles (inc) et compatibles (comp).

La représentation graphique (Figure 9A) suggère que les distributions des couples de conditions mot / pseudomot et compatible / incompatible ne convergeaient pas toutes pour les TR les plus longs. Les distributions tendaient à converger chez les sujets dyslexiques concernant les deux tâches ; alors que les distributions tendaient à converger très légèrement chez les normolecteurs pour la tâche de Simon uniquement. Les convergences et divergences s’observent sur les Figures 9B et 9C.

2.2.2.1. Tâche de décision lexicale

Concernant la tâche de décision lexicale, la Figure 9B apporte des informations supplémentaires à l’analyse non distribuée en montrant une opposition entre les effets de lexicalité, entre sujets dyslexiques et normolecteurs : un effet de lexicalité plus important a été observé chez les sujets dyslexiques (un minimum d’environ 60 ms étant observé dans le quantile Q1) que chez les normolecteurs (un maximum d’environ 60 ms étant observé dans le quantile Q5.)

Il a été proposé que le dernier segment d’une courbe delta d’une situation incompatible (Figure 6B) obtenue à une tâche de Simon serait révélateur de la force de suppression d’une réponse automatique (del Chiaro, 2013 ; Grandjean, 2020). Nous avons supposé que celle-ci pouvait aussi exister dans une tâche de reconnaissance de mots telle une décision lexicale. Ici, le dernier segment décroissant des sujets dyslexiques évoque une force de suppression de la réponse automatique alors que chez les normolecteurs, la divergence des distributions a esquissé un dernier segment delta croissant (Figure 9B). La dynamique de l’effet de lexicalité semble donc bien différente selon les groupes. Outre une différence de taille de l’effet de lexicalité plus importante chez les sujets dyslexiques, on observe pour les TRs les plus lents une augmentation de l’effet de lexicalité chez les normolecteurs alors qu’il diminue chez les sujets dyslexiques.

2.2.2.2. Tâche de Simon (Craft & Simon, 1970)

Concernant la tâche de Simon, la Figure 9C marque une différence entre les effets d'interférence (effets de compatibilité) entre sujets dyslexiques et sujets normolecteurs. Pour les TRs les plus rapides, il existe un plus grand effet de compatibilité chez les sujets dyslexiques (environ 35 ms) que chez les sujets normolecteurs (environ 25 ms). Pour les TRs les plus longs (quantiles Q4 et Q5), l'effet de compatibilité devenait peu à peu similaire entre sujets dyslexiques et sujets normolecteurs, jusqu'à atteindre environ 20 ms.

Le dernier segment de la courbe delta des sujets dyslexiques, décroissant, évoque une force de la suppression de la réponse automatique, alors que le dernier segment de la courbe delta des sujets normolecteurs, presque plat, ne permet pas au premier abord d'évoquer une force de suppression de la réponse automatique sur ce dernier segment. Toutefois, l'effet d'interférence diminuait bien chez les deux groupes. Il se pourrait donc que la force de suppression de la réponse automatique ait eu lieu plus tôt durant la tâche. En effet, la valeur de l'effet de compatibilité d'environ 20 ms semble être une valeur seuil, impossible à réduire car le conflit existera toujours sur cette tâche. Ceci expliquerait le segment Q4Q5 presque plat chez les normolecteurs : ils sont parvenus plus tôt, dès le quantile Q4, à accéder à cette valeur. Peut-être que leur force de suppression se verrait plutôt sur l'avant dernier segment Q3Q4.

Globalement, la dynamique de la gestion de l'interférence reste donc similaire dans les deux groupes. Un décalage constant de latence est observé, ainsi qu'un effet de compatibilité toujours plus grand chez les sujets dyslexiques.

2.2.2.3. Comparaison inter-tâches et inter-groupes

Pour permettre une comparaison entre groupes et tâches, les pentes de chaque dernier segment des courbes delta ont été calculées et se trouvent en Annexe 9 de ce mémoire. Un test de Wilcoxon-Mann-Whitney a été appliqué à l'ensemble des pentes afin de les comparer entre tâches et entre groupes. Le résultat de cette analyse ainsi que les pentes moyennes qui ont été calculées figurent dans le Tableau 5.

Tableau 5. Moyennes et écarts-types des pentes du dernier segment Q4Q5 des courbes delta pour les sujets dyslexiques et normolecteurs, pour les tâches de décision lexicale et de Simon (Craft & Simon, 1970), comparaisons entre les groupes et entre les tâches.

Mesures	Dyslexiques Moyennes (ET)	Normolecteurs Moyennes (ET)	Comp. entre groupes (p)
Pente Q4Q5 Simon	-0,99 (0,131)	-0,006 (0,102)	ns
Pente Q4Q5 DL	-0,089 (0,169)	0,119 (0,124)	*
Comp. entre tâches (p)	ns	ns	

Note. ET : écart-type ; Q4Q5 : segment d'intérêt dans la mesure de la force de suppression d'une réponse automatique ; Comp. : comparaison ; DL : tâche de décision lexicale ; Simon : tâche de Simon (Craft & Simon, 1970) ; ns : non significatif ; * = $p < 0.05$.

Seule une comparaison s'est avérée significative ($p < 0.05$) concernant la tâche de décision lexicale entre les sujets dyslexiques et normolecteurs : la pente était significativement plus grande (et positive) chez les normolecteurs que chez les dyslexiques ; Chez ces derniers, la pente était négative. Cet aspect est discuté dans la discussion de ce mémoire.

Discussion

1. Rappel de l'objectif et des résultats généraux

Les adultes et enfants dyslexiques ont un déficit de détection de leurs erreurs, respectivement sur du matériel langagier écrit (Horowitz-Kraus & Breznitz, 2008) et non langagier (Van De Voorde et al., 2010). Nous ne savions pas si ce déficit pouvait aussi s'exprimer en contexte non langagier chez des adultes. Si tel était le cas, cela suggérerait un déficit général de la détection des erreurs dans la dyslexie. Pour répondre à cette question, une tâche de décision lexicale et une tâche de Simon (Craft & Simon, 1970) ont été proposées à des sujets dyslexiques et normolecteurs adultes. Des mesures comportementales (exactitude, TRs) ainsi que des mesures EEG et EMG, pour mesurer l'onde ERN et les ébauches d'erreurs, ont été effectuées, l'ensemble de ces mesures offrant divers moyens d'étude de la détection et de la correction des erreurs. Cette année, seules les données comportementales de six sujets dyslexiques et sept normolecteurs ont pu être analysées via l'étude de la dynamique temporelle de leurs performances.

Lors de la tâche de décision lexicale, les sujets dyslexiques étaient plus lents que les normolecteurs. Des différences intrigantes concernant la dynamique de l'effet de lexicalité ont été relevées : alors que cet effet décroît à mesure que le TR augmente chez les sujets dyslexiques, celui-ci croît étrangement chez les normolecteurs. Lors de la tâche de Simon (Craft & Simon, 1970), hormis une lenteur parfois plus marquée, les résultats étaient globalement similaires entre les groupes. Les sujets dyslexiques semblaient même parvenir à être plus exacts à partir du quantile Q2 pour les essais incompatibles. Au stade de notre étude, les troubles provoqués par la dyslexie semblent réduire la réussite d'une tâche de décision lexicale, mais pas d'une tâche de Simon (Craft & Simon, 1970). Ces résultats sont discutés plus en détails dans les paragraphes suivants.

2. Tâche de décision lexicale

Concernant la tâche de décision lexicale, les sujets dyslexiques sont plus lents que les normolecteurs. Ceci correspond à une observation classique puisqu'une lecture lente est l'un des critères de la dyslexie (APA, 2015). Cependant, les taux d'erreurs sont équivalents entre les groupes, ce qui ne correspond pas à ce qu'avaient rapporté Horowitz-Kraus et Breznitz (2008). Dans leur étude, les sujets dyslexiques commettaient plus d'erreurs que les normolecteurs, mais leurs stimuli étaient présentés plus rapidement. Les sujets avaient donc moins de temps pour les traiter et les sujets dyslexiques, plus lents, commettaient donc nécessairement plus d'erreurs.

L'analyse distribuée met en évidence un compromis fait par les normolecteurs entre vitesse et précision (Zimmerman, 2011). Ce n'est pas le cas des sujets dyslexiques qui ne parviennent pas à améliorer leurs performances sur les mots pour leurs réponses les plus lentes. Leurs difficultés sont persistantes : soit le mot est reconnu d'emblée, soit l'essai est échoué. Par ailleurs, alors que chez les sujets dyslexiques, la force de suppression de la réponse automatique s'exprime et l'effet de lexicalité diminue à mesure que les TRs augmentent ; chez les normolecteurs, l'effet de lexicalité stagne et augmente pour les TRs les plus lents. Selon Ulrich et al. (2015), le modèle de la double route (De Jong et al., 1994) implique que l'allure de la force de suppression dépend de la vitesse à laquelle la force d'activation automatique agit : si la force d'activation automatique se développe tôt (tard), la pente delta est négative (positive). Pourtant, dans notre étude, la force d'activation semble s'exprimer plus tôt chez les normolecteurs que chez les sujets dyslexiques. Toutefois, les normolecteurs étant plus rapides, si les TRs étaient ajustés selon les compétences, la force d'activation automatique pourrait peut-être apparaître plus tôt chez les sujets dyslexiques.

L'on peut également se demander si la tâche de décision lexicale, au vu des résultats divergents pour les courbes delta et similaires pour les taux d'erreurs, a été traitée pareillement dans les deux groupes. Le niveau d'inhibition requis était-il le même pour un sujet dyslexique qu'un normolecteur ? Lors d'une tâche de décision lexicale, l'inhibition serait en effet requise lorsque la voie sublexicale serait suffisamment rapide pour entrer en compétition avec la voie lexicale, ceci ne pouvant être le cas chez des lecteurs dyslexiques (Luque et al., 2013). D'un côté, les sujets dyslexiques commettraient ainsi des erreurs liées à leurs difficultés de traitement de l'écrit. De l'autre côté, les normolecteurs devraient davantage inhiber leurs réponses, soit car leurs voies de lecture lexicale et sublexicale sont en plus grande compétition comme le suggèrent Luque et al. (2013), soit car, au sein même de la voie lexicale, leurs nombreuses représentations orthographiques s'affrontent et une seule doit être sélectionnée.

3. Tâche de Simon (Craft & Simon, 1970)

La lecture est une activité multimodale comme l'illustre le modèle DIER (Kim, 2020), où des processus de contrôle non spécifiques au langage, impliquant des régions frontales du cerveau, interviennent. Ces régions frontales sont davantage sollicitées par les sujets dyslexiques que les sujets normolecteurs en contexte langagier : les sujets dyslexiques adultes, ayant suivi des rééducations orthophoniques, développent des mécanismes compensatoires en sollicitant davantage leurs régions frontales que les normolecteurs lors du traitement écrit (Habib & Joly-Pottuz, 2008). Nos résultats, obtenus sur une tâche non langagière conflictuelle, sollicitant donc les régions frontales, pourraient supporter le transfert de l'utilisation de mécanismes compensatoires en dehors d'un contexte langagier. En effet, lors de la tâche de Simon (Craft & Simon, 1970), les performances des sujets dyslexiques sont plutôt similaires à celles des normolecteurs. L'on remarque même que les sujets dyslexiques semblent être plus performants que les normolecteurs sur les essais incompatibles à partir du quantile Q2.

Les mécanismes de compensation des sujets dyslexiques leur permettent, pour les TRs les plus longs, d'atteindre la même valeur minimale d'effet de compatibilité que les normolecteurs, soit environ 20 ms. Les sujets dyslexiques parvenant à atteindre cette valeur, certes plus tard (mais étant plus lents), ces observations ne permettent pas de dire que les sujets dyslexiques présentent un déficit de suppression d'une réponse automatique. Cela évoque simplement que le conflit généré par un essai incompatible requiert plus de temps aux sujets dyslexiques à être résolu. Chez les sujets dyslexiques, ce temps pourrait correspondre à la durée nécessaire au déploiement de stratégies métacognitives, comprenant des capacités comme la surveillance et l'autorégulation, s'ajustant selon la connaissance de ses propres processus cognitifs (Saint-Pierre, 1991). A ce stade d'étude, les bons résultats et l'adaptation des sujets dyslexiques ne semblent pas concorder avec ceux de Van De Voorde et al. (2010), qui rapportaient un déficit de détection de l'erreur chez des enfants dyslexiques lors d'une tâche de conflit via l'étude de l'onde ERN. Toutefois, d'une part leurs participants étaient des enfants qui n'avaient donc peut-être pas encore mis en place de stratégies compensatoires, et d'autre part, nous n'avons pu analyser l'onde ERN cette année. Les futures analyses électrophysiologiques permettront donc de préciser nos premiers résultats.

4. Comparaison des tâches

La tâche de décision lexicale est traitée plus lentement que la tâche de Simon dans les deux groupes. Ceci est lié aux natures différentes, langagière et non langagière, des stimuli.

Les normolecteurs réalisent un compromis entre vitesse et précision (Zimmerman, 2011) lors de la tâche de Simon et la tâche de décision lexicale. Ce n'est pas le cas pour des sujets dyslexiques

qui réalisent ce compromis seulement sur la tâche de Simon. Les troubles rencontrés dans la dyslexie semblent donc impacter les performances sur une tâche de décision lexicale mais pas sur une tâche de Simon.

5. Limites

L'étude menée présente plusieurs limites. De manière globale, les échantillons sont trop petits pour que les résultats puissent être généralisés.

D'autre part, les courbes tracées lors de l'analyse distribuée pour chaque sujet sont les témoins visuels d'une grande variabilité inter-individuelle. En effet, les courbes CAF et delta de chaque sujet se trouvant respectivement en Annexes 8 et 11 sont très variables d'un sujet à l'autre.

Par ailleurs, malgré la consigne donnée, les sujets pouvaient ajuster leur compromis vitesse-précision au cours de la tâche. En raison de la durée de l'expérience, il est possible qu'une éventuelle fatigue ait pu affecter ce compromis comme le suggère Vidal (2015).

Enfin, il est difficile d'isoler des processus de contrôle via une analyse purement chronométrique. Elle devra être complétée du traitement des mesures électrophysiologiques.

6. Conclusion et intérêt pour la pratique orthophonique

Aujourd'hui, l'étalement souhaité de l'étude menée par Horowitz-Kraus et Breznitz (2008) à l'aide d'une tâche non langagière est faible. A la tâche de Simon (Craft & Simon, 1970), la seule différence significative étant une résolution plus lente des essais incompatibles par les sujets dyslexiques que normolecteurs, il est hâtif de conclure en un déficit des processus de contrôle cognitif en contexte non langagier chez les sujets dyslexiques, d'autant plus en connaissance de leurs taux d'erreurs similaires à ceux des normolecteurs. Les processus de contrôle cognitif des sujets dyslexiques pourraient ne pas être altérés, ou bien cela n'est pas décelable via une analyse qui n'inclut pas les mesures EEG et EMG initialement prévues.

L'étude présente un intérêt orthophonique car elle permet d'améliorer la compréhension de la dyslexie. Si la poursuite de l'analyse incluant les mesures électrophysiologiques met en évidence un déficit général de détection de l'erreur en contexte non langagier chez des adultes comme l'avaient constaté Van De Voorde et al. (2010) chez des enfants, celui-ci pourrait contribuer à l'explication de la persistance des erreurs commises par les sujets dyslexiques. Si ce déficit n'est pas retrouvé chez des adultes dyslexiques mais seulement chez des enfants dyslexiques, ceci supporterait une amélioration de la détection des erreurs due à la maturation des lobes frontaux liée à l'âge et/ou à la rééducation orthophonique. L'effet bénéfique d'un entraînement intensif de lecture a déjà été retrouvé sur la détection des erreurs : un entraînement d'une durée de huit semaines, d'une fréquence de trois fois par semaine, permet de doubler l'amplitude de l'onde ERN chez des sujets dyslexiques pendant que ce gain est moins prononcé chez les normolecteurs (Horowitz-Kraus, 2016). A ce jour, notre étude par chronométrie mentale seule supporte déjà que les sujets dyslexiques ont développé suffisamment de stratégies compensatoires au fil des années face au contexte écrit, pour les transférer en dehors du contexte langagier. Ce transfert souligne l'intérêt d'intégrer le développement des stratégies métacognitives aux principes de rééducation orthophonique de la dyslexie. En effet, un programme d'entraînement des capacités métacognitives a permis d'améliorer les capacités neuropsychologiques d'étudiants dyslexiques (Moradi & Mirbod, 2020). Les effets bénéfiques d'une prise en charge orthophonique du langage écrit, incorporant le développement de stratégies métacognitives, pourraient donc être multimodaux en impactant des processus langagiers et en se transférant à des domaines non langagiers.

Conclusion

L'objectif de l'étude était d'analyser les mécanismes de contrôle cognitif, particulièrement la surveillance des erreurs, chez des sujets dyslexiques comparativement à des normolecteurs. Un déficit de détection de l'erreur étant uniquement rapporté en contexte langagier chez des adultes dyslexiques (Horowitz-Kraus & Breznitz, 2008) et non langagier chez des enfants dyslexiques (Van De Voorde et al., 2010), une tâche langagière de décision lexicale et une tâche non langagière de Simon (Craft & Simon, 1970) ont été proposées, afin d'étudier la spécificité de ce déficit. Durant celles-ci, des mesures comportementales (exactitude, vitesse) ainsi que des mesures EEG et EMG, pour observer l'onde d'erreur et les ébauches d'erreurs, ont été effectuées. Cette année, seules les données comportementales de six sujets dyslexiques et sept normolecteurs ont pu être analysées. Une analyse de première intention a été effectuée, s'appuyant sur les TRs et taux d'erreurs moyens. Une deuxième analyse, plus fine, a été réalisée en distribuant les données par quantiles. Elle a permis d'observer la dynamique temporelle des processus de contrôle cognitif, dont les forces d'activation et de suppression d'une réponse automatique sont des indices.

Pour la tâche de décision lexicale, les sujets dyslexiques sont plus lents que les normolecteurs, indifféremment du type de stimulus et de l'exactitude de leur réponse, et leur effet de lexicalité est significativement plus grand. Cela correspond à certains résultats rapportés par Horowitz-Kraus et Breznitz (2008) : les sujets dyslexiques sont plus lents que les normolecteurs. Par ailleurs, notre analyse montre que les sujets normolecteurs réalisent un compromis entre vitesse et précision leur permettant d'améliorer leur exactitude à mesure que le TR augmente, mais pas les sujets dyslexiques. D'autre part, des résultats intrigants sur la dynamique de l'effet de lexicalité et sur des taux d'erreurs similaires entre sujets dyslexiques et normolecteurs laissent penser que les erreurs commises n'ont pas la même origine selon le groupe. En effet, les sujets dyslexiques semblent commettre des erreurs liées à leurs difficultés écrites alors que les normolecteurs semblent commettre paradoxalement des erreurs liées à leurs capacités plus développées. En effet, leurs voies de lecture lexicale et sublexicale sont en plus grande compétition (Luque et al., 2013) que chez les sujets dyslexiques et leurs nombreuses représentations orthographiques s'affrontent, pouvant susciter une erreur. Dans ce contexte où les compétences écrites diffèrent, sans mesure EEG et EMG, il est impossible d'attribuer nos observations à un déficit des processus de contrôle.

Pour la tâche de Simon (Craft & Simon, 1970), les sujets dyslexiques sont plus lents à répondre correctement aux essais incompatibles. L'analyse distribuée dresse des patrons de réponse similaires, avec une force d'activation de la réponse automatique légèrement plus marquée chez les sujets dyslexiques que normolecteurs. A partir du quantile Q2 (environ 450 ms), les sujets dyslexiques sont cependant les plus performants. Quant aux forces de suppression, celles-ci ont des allures différentes selon le groupe mais se rejoignent. Ces éléments supportent, chez le sujet dyslexique adulte, un transfert des mécanismes de compensation, développés en contexte écrit au fil des années, à un contexte non langagier : la surveillance de leurs actions leur permet de s'améliorer sur une tâche non langagière.

Ainsi, à ce jour, peu d'éléments sont présents pour avancer une atteinte générale des processus de contrôle des personnes dyslexiques. L'étude menée présente des limites en raison du faible nombre de participants et des variabilités inter-individuelles. Par ailleurs, une part des observations, que nous ne pouvons extraire de l'analyse comportementale, peut s'attribuer aux mécanismes compensatoires des sujets dyslexiques. Il serait intéressant de reproduire cette étude chez des enfants, chez qui ces stratégies ne sont pas encore en place. Les mesures électrophysiologiques n'ayant pu être analysées cette année, il s'agira d'abord de poursuivre la recherche entamée en l'étayant des données EEG et EMG.

Bibliographie

American Psychiatric Association. (2015). *DSM-5-Manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux*. Elsevier Masson.

Balogh, L., & Czobor, P. (2016). Post-error slowing in patients with ADHD: a meta-analysis. *Journal of attention disorders*, 20(12), 1004-1016.

Barrouillet, P., Billard, C., De Agostini, M., Démonet, J. F., Fayol, M., Gombert, J. E., ... & Valdois, S. (2007). *Dyslexie, dysorthographe, dyscalculie: bilan des données scientifiques* [Doctoral dissertation, Institut national de la santé et de la recherche médicale (INSERM)].

Caci, H., Deschaux, O., et Baylé, F. J. (2007). Psychometric properties of the French versions of the BIS/BAS scales and the SPSRQ. *Personality and Individual Differences*, 42, 987–998.

Carrion, C. (2010). *Exposition à l'erreur orthographique: les conséquences sur les connaissances acquises et en cours d'acquisition* [Doctoral dissertation, Paris 5].

Cartwright, K. B. (2012). Insights from cognitive neuroscience: The importance of executive function for early reading development and education. *Early Education & Development*, 23(1), 24-36.

Carver, C. S., et White, T. L. (1994). Behavioral inhibition, behavioral activation, and affective responses to impending reward and punishment: The BIS/BAS Scales. *Journal of Personality and Social Psychology*, 67(2), 319–333.

Cohen, J. D. (2017). Cognitive control. *The Wiley Handbook of Cognitive Control*, 1-28.

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.

Craft, J. L. et Simon, J. R. (1970). Processing symbolic information from a visual display: interference from irrelevant directional cue. *Journal of Experimental Psychology*, 83:415–420.

Criswell, E. (2010). *Cram's introduction to surface electromyography*. Jones & Bartlett Publishers.

Deauvieu, J. (2018). Méthodes de lecture, la syllabique plus efficace. *Sciences Humaines*, (10), 10-10.

Dehaene, S. (2012, 20 novembre). *Les grands principes de l'apprentissage*. [Conférence]. Sciences cognitives et éducation, Collège de France à Paris.
<https://www.college-de-france.fr/site/stanislas-dehaene/symposium-2012-11-20-10h00.htm>

De Jong, R., Liang, C. C., & Lauber, E. (1994). Conditional and unconditional automaticity: a dual-process model of effects of spatial stimulus-response correspondence. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20(4), 731.

del Chiaro, I. S. (2013). *Le rôle de l'attention dans le contrôle de l'interférence: une approche comportementale et neuropsychologique* [Doctoral dissertation, Aix Marseille Université].

Elbro, C., & Scarborough, H. (2004). Early Identification. In T. Nunes & P. Bryant, *Handbook of Children's Literacy*. Springer.

Ficarella, S. C., Rochet, N., & Burle, B. (2019). Becoming aware of subliminal responses: an EEG/EMG study on partial error detection and correction in humans. *Cortex*, 120, 443-456.

Falkenstein, M., Hohnsbein, J., Hoormann, J. et Blanke, L. (1991). Effects of crossmodal divided attention on late ERP components. II. Error processing in choice reaction tasks. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 78:447-455.

Falkenstein, M., Hoormann, J., Christ, S., and Hohnsbein, J. (2000). ERP components on reaction errors and their functional significance: a tutorial. *Biological Psychology*, 51, 87-107.

Fayol, M., & Jaffré, J. P. (2008). *Orthographier*. Paris: Presses Universitaires de France.

Gehring, W. J., Goss, B., Coles, M. G. H., Meyer, D. E. et Donchin, E. (1993). A neural system for error detection and compensation. *Psychological Science*, 4(6):385-390.

Giguere, J., Giasson, J., & Simad, C. (2002). Les relations entre la lecture et l'écriture: Représentations d'élèves de différents niveaux scolaires et de différents niveaux d'habileté. *Canadian Journal of Applied Linguistics*, 5(1), 23-50.

Gola-Asmussen, C., Lequette, C., Pouget, G., Rouyer, C. et Zorman, M. (2010). Ecla 16+ Evaluation des compétences de lecture chez l'adulte de plus de 16 ans.

Grandjean, A. (2020). *Le contrôle de l'interférence chez les adolescents avec un trouble de l'attention avec ou sans hyperactivité (TDAH)* [Doctoral dissertation, Aix Marseille Université].

Grisetto, F., Delevoye-Turrell, Y., & Roger, C. (2019, November 14-15). *Understanding impulsiveness using the dual mechanisms of control (DMC) framework*. Presentation to Université Catholique de Louvain (UCL), Cross-Border Vision of the Links Between Action and Cognition in Psychology (VITACOG), Louvain-la-Neuve, Belgium.

Habib, M. (2018). *La constellation des dys: bases neurologiques de l'apprentissage et de ses troubles*. De Boeck Supérieur.

Habib, M., & Joly-Pottuz, B. (2008). Dyslexie, du diagnostic à la thérapeutique: un état des lieux. *Revue de Neuropsychologie*, 18(4), 247-325.

Hoover, W. A., & Gough, P. B. (1990). The simple view of reading. *Reading and writing*, 2(2), 127-160.

Horowitz-Kraus, T. (2016). Improvement of the error-detection mechanism in adults with dyslexia following reading acceleration training. *Dyslexia*, 22(2), 173-189.

Horowitz-Kraus, T., & Breznitz, Z. (2008). An error-detection mechanism in reading among dyslexic and regular readers—An ERP study. *Clinical Neurophysiology*, 119(10), 2238-2246.

Horowitz - Kraus, T., & Breznitz, Z. (2011a). Error Detection Mechanism for Words and Sentences: A comparison between readers with dyslexia and skilled readers. *International Journal of Disability, Development and Education*, 58(1), 33-45.

Horowitz - Kraus, T., & Breznitz, Z. (2011b). Reaction time and accuracy in erroneous vs correct responses among dyslexic and regular readers: From letters to sentences. *Dyslexia*, 17(1), 72-84.

Ito, J., & Kitagawa, J. (2006). Performance monitoring and error processing during a lexical decision task in patients with Parkinson's disease. *Journal of geriatric psychiatry and neurology*, 19(1), 46-54.

Jacquier-Roux, M., Valdois, S., Zorman, M., Lequette, C., & Pouget, G. (2005). *ODEDYS-2, outils de dépistage des dyslexies*. Grenoble, France : Laboratoire Cogni-sciences.

Janssen, T. W. P., van Atteveldt, N., & Oosterlaan, J. (2020). Error and post-error processing in children with attention-deficit/hyperactivity disorder: An electrical neuroimaging study. *Clinical Neurophysiology*, 131(9), 2236-2249.

Kim, Y. S. G. (2020). Toward integrative reading science: The direct and indirect effects model of reading. *Journal of learning disabilities*, 53(6), 469-491.

Kuczynski, B., & Kolakowsky-Hayner, S. (2011). Inhibition. In J. S. Kreutzer, J. DeLuca, & B. Caplan (Eds.), *Encyclopedia of Clinical Neuropsychology* (pp. 1319-1320). New York: Springer

Lefavrais, P. (1965). Test de l'Alouette. Paris: Editions du Centre de Psychologie Appliquée.

Lefly, D. L. et Pennington, B. F. (2000). Reliability and validity of the adult reading history questionnaire. *Journal of Learning Disabilities*, 33, 286–296

Loftis, C. (2011). Mental flexibility. In J. S. Kreutzer, J. DeLuca, & B. Caplan (Eds.), *Encyclopedia of Clinical Neuropsychology* (p. 1572). New York: Springer

Luque, J. L., López-Zamora, M., Álvarez, C. J., & Bordoy, S. (2013). Beyond decoding deficit: inhibitory effect of positional syllable frequency in dyslexic Spanish children. *Annals of Dyslexia*, 63(3-4), 239-252.

Lyon, G. R., Shaywitz, S. E., & Shaywitz, B. A. (2003). A definition of dyslexia. *Annals of dyslexia*, 53(1), 1-14.

Lyons, K. E., & Zelazo, P. D. (2011). Monitoring, metacognition, and executive function: Elucidating the role of self-reflection in the development of self-regulation. *Advances in child development and behavior*, 40, 379-412.

Mathalon, D. H., Bennett, A., Askari, N., Gray, E. M., Rosenbloom, M. J., & Ford, J. M. (2003). Response-monitoring dysfunction in aging and Alzheimer's disease: an event-related potential study. *Neurobiology of aging*, 24(5), 675-685.

Mathalon, D. H., Fedor, M., Faustman, W. O., Gray, M., Askari, N., & Ford, J. M. (2002). Response-monitoring dysfunction in schizophrenia: an event-related brain potential study. *Journal of abnormal psychology*, 111(1), 22.

Menghini, D., Finzi, A., Benassi, M., Bolzani, R., Facoetti, A., Giovagnoli, S., ... & Vicari, S. (2010). Different underlying neurocognitive deficits in developmental dyslexia: a comparative study. *Neuropsychologia*, 48(4), 863-872.

Mohamed, S. M., Börger, N. A., Geuze, R. H., & van Der Meere, J. J. (2019). Error monitoring and daily life executive functioning. *Experimental brain research*, 237(9), 2217-2229.

Moradi, M. R., & Mirbod, S. M. (2020). The Effectiveness of Training of Jager's knowledge and Metacognitive Skill Program on Improving Neuropsychological skills in Students with Dyslexia. *Neuropsychology*, 6(1), 17-30.

Morton, J. B., Ezekiel, F., & Wilk, H. A. (2011). Cognitive control: Easy to identify but hard to define. *Topics in Cognitive Science*, 3(2), 212-216.

New, B., Pallier, C., Ferrand, L., & Matos, R. (2001). Une base de données lexicales du français contemporain sur internet: LEXIQUE™//A lexical database for contemporary french: LEXIQUE™. *L'année Psychologique*, 101(3), 447-462.

Nicolson, R. I., Fawcett, A. J., & Dean, P. (2001). Developmental dyslexia: the cerebellar deficit hypothesis. *Trends in neurosciences*, 24(9), 508-511.

Nouwens, S., Groen, M. A., Kleemans, T., & Verhoeven, L. (2021). How executive functions contribute to reading comprehension. *British Journal of Educational Psychology*, 91(1), 169-192.

Organisation Mondiale de la Santé (1994). *Classification Internationale des Maladies*. Issy-les-Moulineaux, Masson.

Patton, J. H., Stanford, M. S., et Barratt, E. S. (1995). Factor structure of the Barratt impulsiveness scale. *Journal of Clinical Psychology*, 51(6), 768–774.

Pauc, R. (2005). Comorbidity of dyslexia, dyspraxia, attention deficit disorder (ADD), attention deficit hyperactive disorder (ADHD), obsessive compulsive disorder (OCD) and Tourette's syndrome in children: A prospective epidemiological study. *Clinical chiropractic*, 8(4), 189-198.

Polanczyk, G. V., Willcutt, E. G., Salum, G. A., Kieling, C., & Rohde, L. A. (2014). ADHD prevalence estimates across three decades: an updated systematic review and meta-regression analysis. *International journal of epidemiology*, 43(2), 434-442.

Poncelet, M., Majerus, S., Van Der Linden, M. (2009). *Traité de neuropsychologie de l'enfant*. Marseille: Solal.

Rabbitt, P., & Rodgers, B. (1977). What does a man do after he makes an error? An analysis of response programming. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 29(4), 727-743.

Ramus, F., & Szenkovits, G. (2008). What phonological deficit? *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 61(1), 129-141.

Raven, J., Raven, J. C. et Court, J. H. (1998). Advanced progressive matrices. Oxford: Oxford Psychologists Press.

R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

Rey, A., Pacton, S., et Perruchet, P. (2005). L'erreur dans l'acquisition de l'orthographe. *Rééducation orthophonique*, 222, 101-119.

Roger, C. (2009). *Supervision de l'action et optimisation des comportements: Etudes électrophysiologiques et IRMf* [Doctoral dissertation].

Saint-Pierre, L. (1991). L'étude et les stratégies d'apprentissage. *Pédagogie collégiale*, 5(2), 15-21.

Simon, J. R., Acosta, E., Mewaldt, S. P., & Speidel, C. R. (1976). The effect of an irrelevant directional cue on choice reaction time: Duration of the phenomenon and its relation to stages of processing. *Perception & Psychophysics*, 19(1), 16-22.

Stanké, B., Ferlatte, M. A., & Granger, S. (2016). Apprentissage avec erreurs et sans erreur de l'orthographe lexicale. *La nouvelle revue de l'adaptation et de la scolarisation*, (4), 65-83.

Stein, J. F., & Fowler, M. S. (1993). Unstable binocular control in dyslexic children. *Journal of Research in Reading*, 16(1), 30-45.

- Stürmer, B., Seiss, E., & Leuthold, H. (2005). Executive control in the Simon task: A dual-task examination of response priming and its suppression. *European Journal of Cognitive Psychology*, 17(5), 590-618.
- Swanson, H. L., Trainin, G., Necochea, D., & Hammill, D. (2003). Rapid Naming, Phonological Awareness, and Reading : A Meta-Analysis of the Correlation Evidence. *Review of Educational Research*, 73(4), 407-440.
- Sweet, L., & Jerskey, B. (2011). Working memory. In J. S. Kreutzer, J. DeLuca, & B. Caplan (Eds.), *Encyclopedia of Clinical Neuropsychology* (pp. 2729-2730). New York: Springer
- Tallal, P. (1980). Auditory temporal perception, phonics, and reading disabilities in children. *Brain and language*, 9(2), 182-198.
- Ulrich, R., Schröter, H., Leuthold, H., & Birngruber, T. (2015). Automatic and controlled stimulus processing in conflict tasks: Superimposed diffusion processes and delta functions. *Cognitive psychology*, 78, 148-174.
- Unterrainer, J. M., & Owen, A. M. (2006). Planning and problem solving: from neuropsychology to functional neuroimaging. *Journal of Physiology-Paris*, 99(4-6), 308-317.
- Van Den Wildenberg, W. P., Wylie, S. A., Forstmann, B. U., Burle, B., Hasbroucq, T., & Ridderinkhof, K. R. (2010). To head or to heed? Beyond the surface of selective action inhibition: a review. *Frontiers in human neuroscience*, 4, 222.
- Van De Voorde, S., Roeyers, H., & Wiersema, J. R. (2010). Error monitoring in children with ADHD or reading disorder: An event-related potential study. *Biological Psychology*, 84(2), 176-185.
- Veen, V. V., & Carter, C. S. (2002). The timing of action-monitoring processes in the anterior cingulate cortex. *Journal of cognitive neuroscience*, 14(4), 593-602.
- Vidal, F. (2015). Neurophysiologie de l'erreur. *Revue Neurologique*, 171, A200.
- Vidal, F., Hasbroucq, T., Grapperon, J., & Bonnet, M. (2000). Is the 'error negativity' specific to errors?. *Biological psychology*, 51(2-3), 109-128.
- Vidyasagar, T. R., & Pammer, K. (2010). Dyslexia: a deficit in visuo-spatial attention, not in phonological processing. *Trends in cognitive sciences*, 14(2), 57-63.
- Wilson, A. J., Andrewes, S. G., Struthers, H., Rowe, V. M., Bogdanovic, R., & Waldie, K. E. (2015). Dyscalculia and dyslexia in adults: cognitive bases of comorbidity. *Learning and individual differences*, 37, 118-132.
- Zimmerman, M. E. (2011). Speed-accuracy tradeoff. In J. S. Kreutzer, J. DeLuca, & B. Caplan (Eds.), *Encyclopedia of Clinical Neuropsychology* (p. 2344). New York: Springer

Zorman, M. (2002). La dyslexie de surface développementale. Etude d'un cas. *Les dyslexies*, 56-65.