

*ÉCOLE DOCTORALE Vie et Santé*  
LNCA

**THÈSE** présentée par :  
**Gwendoline Mahé**

soutenue le : **4 juillet 2013**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université de Strasbourg**

Discipline/ Spécialité : Neurosciences

**La reconnaissance visuelle des mots  
chez le dyslexique: Implication des  
voies ventrale et dorsale**

THÈSE dirigée par :

**DUFOUR André**

PR, université de Strasbourg

RAPPORTEURS :

**ZAGAR Daniel**

PR, Université de Lorraine

**Valdois Sylviane**

DR2, Université de Grenoble

---

AUTRES MEMBRES DU JURY :

**DOIGNON-CAMUS Nadège, Co-directeur**

MC, Université de Strasbourg

**MANNIG Liliann**

PR, Université de Strasbourg

**DE SAINT-MARTIN Anne**

DR, CHU Hôpital de Hautepierre, Strasbourg

«Les passions sont les vents qui enflent les voiles du navire; elles le submergent quelquefois, mais sans elles il ne pourrait voguer».

Voltaire, extrait de *Zadig ou la destinée*, chapitre XX.

## **Remerciements**

Je tiens tout d'abord à remercier très chaleureusement mes encadrantes: Nadège Doignon-Camus et Anne Bonnefond. Merci d'avoir cru en moi dès le début et de m'avoir guidée ces quelques années! Je reste particulièrement touchée par votre soutien dans chaque moment difficile, votre grande disponibilité, votre sollicitude à mon égard. Tout en stimulant ma passion pour la recherche, vous m'avez transmis tout ce que je sais aujourd'hui. Vous m'avez poussé à toujours donner le meilleur de moi-même et m'avez appris à prendre confiance en moi, ce qui représente beaucoup. J'ai de la chance d'avoir été votre première doctorante. Notre collaboration représente une des expériences les plus riches de ma vie. J'espère que nous aurons l'occasion de collaborer à nouveau ensemble dans l'avenir!

Je remercie André Dufour d'avoir permis cette collaboration en dirigeant officiellement ma thèse et de m'avoir offert de bonnes conditions de travail dans son laboratoire.

Je suis très touchée et je remercie Daniel Zagar, Sylviane Valdois, Liliann Manning et Anne de Saint-Martin d'avoir accepté de juger mon travail en formant mon jury de thèse.

Je tiens également à remercier l'équipe du CRTA ainsi que l'APEDA pour leur intérêt dans nos travaux et leur aide pour le recrutement des sujets dyslexiques. Merci à l'ensemble des sujets qui ont accepté de participer aux différentes études de ce projet de recherche.

Je remercie Anne Giersch ainsi que toute l'équipe de l'INSERM 1114 pour leur accueil chaleureux durant ma dernière année de thèse. Merci à toutes les personnes qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail, dont Françoise, Alain, Thierry, Charlotte, Christine et Rémi.

Un grand merci à mes camarades doctorants et à ceux de master (qui j'en suis sûre auront la chance de vivre cette aventure) pour leur présence avec une forte pensée pour Bérengère et Anne-Clémence! Merci à Veronica, Aurélie et Laura pour les passations avec les enfants!

Merci à mes proches de m'avoir donné les ressources pour mener à bien cette aventure. Merci à mes parents de m'avoir autant soutenue et d'avoir toujours accepté mes choix.



# Table des matières

<b>Chapitre 1. Introduction.....</b>	<b>p.1</b>
<b>Partie 1. La reconnaissance visuelle des mots chez les lecteurs experts.....</b>	<b>p.4</b>
<b>I. L’expertise pour le traitement de l’écrit au niveau de la voie ventrale.....</b>	<b>p.4</b>
1. La fonction du gyrus fusiforme gauche .....	p.6
2. L’organisation anatomique du gyrus fusiforme gauche.....	p.12
3. L’apport des études électrophysiologiques.....	p.15
<b>II. Les processus attentionnels et phonologiques au niveau de la voie dorsale.....</b>	<b>p.19</b>
<b>1. Les processus attentionnels dans la reconnaissance visuelle des mots.....</b>	<b>p.19</b>
1.1.L’orientation attentionnelle et l’inhibition lors du traitement des stimuli écrits.....	p.21
1.2.Le traitement sériel des stimuli écrits: implication de l’attention visuo-spatiale.....	p.23
1.3.L’influence de l’attention visuo-spatiale sur l’activité du gyrus fusiforme gauche.....	p.26
<b>2. Les processus phonologiques dans la reconnaissance visuelle des mots.....</b>	<b>p.29</b>
2.1.L’activation des représentations phonologiques .....	p.30
2.2.Le traitement sériel: décodage phonologique .....	p.32

2.3.L'acquisition des correspondances lettres-sons et la spécialisation du gyrus fusiforme gauche .....	p.35
<b>Conclusion.....</b>	<b>p.37</b>
<b>Partie 2. La reconnaissance visuelle des mots chez les lecteurs dyslexiques.....</b>	<b>p.38</b>
<b>I. Une expertise pour le traitement écrit chez les lecteurs dyslexiques?.....</b>	<b>p.40</b>
1. Défaut d'expertise visuelle pour l'écrit et corrélats neuro-anatomiques.....	p.40
2. Défaut d'expertise visuelle pour l'écrit et corrélat électrophysiologique.....	p.44
<b>II. Les traitements phonologique et attentionnel chez les lecteurs dyslexiques.....</b>	<b>p.47</b>
<b>1. Les déficits phonologiques des lecteurs dyslexiques.....</b>	<b>p.47</b>
1.1.Les déficits phonologiques observés.....	p.47
1.2.Les mécanismes de compensation observés.....	p.50
1.3.L'impact des déficits phonologiques sur l'expertise de l'écrit.....	p.51
<b>2. Les déficits attentionnels des lecteurs dyslexiques.....</b>	<b>p.52</b>
2.1.Les déficits du déplacement sériel de l'attention.....	p.52
2.2.Les déficits d'empan visuo-attentionnel.....	p.57
<b>Partie 3. Objectifs.....</b>	<b>p.61</b>

**Chapitre 2. Méthode.....p.62**

**Partie 1. Les critères de sélection des sujets.....p.62**

**Partie 2. L'enregistrement et l'analyse des ERP.....p.64**

**I. Enregistrements électrophysiologiques et potentiels évoqués.....p.64**

**II. Analyses off-line des ERP.....p.66**

**1. Etudes 1, 2 et 3.....p.66**

**2. Etude 5.....p.67**

**Chapitre 3. Partie expérimentale.....p.68**

**Partie 1. Les voies ventrale et dorsale dans le traitement des mots écrits.....p.68**

**I. Etude 1. Appariement sur l'âge chronologique: lecteurs dyslexiques vs. lecteurs experts.....p.69**

**1. Méthode.....p.69**

**2. Résultats.....p.73**

**3. Discussion.....p.81**

**4. Conclusion et transition.....p.88**

**II. Etude 2. Appariement sur le niveau de lecture: les adultes mauvais lecteurs.....p.89**

**1. Introduction.....p.**

2. Méthode.....	p.90
3. Résultats.....	p.93
4. Discussion.....	p.102
5. Conclusion et transition.....	p.105
<b>Partie 2. L'expertise pour le traitement de l'écrit.....</b>	<b>p.106</b>
<b>Etude 3. La spécialisation du composant N170.....</b>	<b>p.106</b>
1. Introduction.....	p.106
2. Méthode.....	p.107
3. Résultats.....	p.112
4. Discussion.....	p.118
5. Conclusion.....	p.121
<b>Partie 3. L'attention visuo-spatiale dans le traitement des stimuli visuels langagiers et non langagiers.....</b>	<b>p.123</b>
<b>I. Etude 4. La sélection attentionnelle.....</b>	<b>p.126</b>
1. Introduction.....	p.126
2. Méthode.....	p.127
3. Résultats.....	p.130
4. Discussion.....	p.
<b>II. Etude 5. L'orientation attentionnelle et l'inhibition .....</b>	<b>p.136</b>

<b>1. Introduction.....</b>	<b>p.136</b>
<b>2. Méthode.....</b>	<b>p.140</b>
<b>3. Résultats.....</b>	<b>p.144</b>
<b>4. Discussion.....</b>	<b>p.148</b>

**Chapitre 4. Discussion.....p.153**

<b>I. La spécialisation de la voie ventrale .....</b>	<b>p.156</b>
<b>1. Le traitement expert des mots familiers.....</b>	<b>p.156</b>
<b>2. Le traitement expert des caractères écrits.....</b>	<b>p.157</b>
<b>3. Le traitement expert des groupes de lettres.....</b>	<b>p.159</b>
<b>II. Influence du traitement phonologique sur le traitement expert de l'écrit.....</b>	<b>p.162</b>
<b>1. Les déficits phonologiques observés au niveau comportemental.....</b>	<b>p.163</b>
<b>2. Un accès aux représentations phonologiques préservé chez les lecteurs dyslexiques?.....</b>	<b>p.163</b>
<b>3. Impact des déficits phonologiques sur la spécialisation de la voie ventrale pour le traitement expert de l'écrit.....</b>	<b>p.164</b>
<b>III. Influence de l'attention visuo-spatiale sur le traitement expert l'écrit.....</b>	<b>p.167</b>
<b>1. L'orientation de l'attention vers la cible à traiter.....</b>	<b>p.167</b>

2. La détection du conflit: un déficit spécifique aux lecteurs dyslexiques.....	p.170
3. L'inhibition des stimuli adjacents.....	p.171
IV. Implication de nos résultats et perspectives.....	p.174
1. La dyslexie développementale.....	p.174
2. Caractérisation des lecteurs dyslexiques et des mauvais lecteurs.....	p.175
3. Perspectives développementales.....	p.177
4. Les modèles de reconnaissance visuelle des mots.....	p.178
Conclusion générale.....	p.180
Références.....	p.182
Table des abréviations.....	p.213
Annexes.....	p.214
Annexe 1. Publications.....	p.215
Annexe 2. Communications.....	p.216
Annexe 3. Test de l'Alouette.....	p.217
Annexe 4. Test de dénomination.....	p.218
Annexe 5. Liste des items des études 1 et 2.....	f
Annexes 6. Liste des items de l'étude 3.....	p.224
Annexe 7. Liste des items de l'étude 4.....	p.231

# Chapitre 1. Introduction

La lecture consiste à déchiffrer les caractères écrits d'une langue. Cette activité cognitive implique à la fois la reconnaissance visuelle et la compréhension des mots écrits (Hoover & Gough, 1990). L'objectif de ce projet de recherche est d'étudier la reconnaissance visuelle des mots chez les lecteurs dyslexiques. La reconnaissance visuelle des mots correspond à la récupération de la représentation mentale d'un mot à partir de sa forme écrite. Ce processus met en jeu l'intégration de représentations orthographiques (i.e., l'identité et l'ordre des lettres), phonologiques (i.e., les phonèmes, les syllabes ou les mots parlés) et sémantiques (i.e., l'ensemble des connaissances conceptuelles à l'origine de la compréhension des mots).

De nombreux modèles ont décrit les différentes étapes impliquées dans la reconnaissance visuelle des mots. C'est le cas des modèles à double voie tels que les modèles 'Interactive Activation' (IA; McClelland & Rumelhart, 1981; Rumelhart, & McClelland, 1982), 'Dual Route Cascaded' (DRC; Coltheart, Rastle, Perry, Langdon, & Ziegler, 2001) ou 'Connectionist Dual Process' (CDP+; Perry, Ziegler, & Zorzi, 2007), ainsi que des modèles envisageant deux procédures de lecture comme le 'Multi-Trace Memory model' (MTM; Ans, Carbonnel, & Valdois). Dans la plupart de ces modèles, le premier niveau de traitement est purement visuel et concerne l'analyse des traits qui forment les lettres (Coltheart et al., 2001; McClelland & Rumelhart, 1981; Perry et al., 2007). Comme pour les autres catégories de stimuli visuels, le traitement des stimuli écrits part de la rétine vers le corps genouillé latéral (Figure 1a), où il se divise en deux voies qui acheminent les informations vers le cortex visuel primaire (V1, AB 17). La voie parvocellulaire permet la reconnaissance des objets tandis que la voie magnocellulaire sous-tend le traitement du mouvement et de la profondeur. Cette division du traitement visuel se poursuit au-delà de V1, au niveau des voies ventrale et dorsale (Ungerleider & Mishkin, 1982, Figure 1b). A partir de V1, la voie ventrale s'oriente vers les

gyri fusiforme (AB 37) et temporal inférieur (AB 20) et la voie dorsale vers les cortex pariétaux postérieur (AB 7) et postérieur inférieur (AB 39-40). Des études de cas de patients présentant des lésions sélectives au niveau de ces deux voies ont associé la voie ventrale à l'identité des objets (Milner & Goodale, 1995) et la voie dorsale aux attributs visuels reliés à l'espace tels que le mouvement, la profondeur et les relations de position (Von Cramon & Kerkhoff, 1993).

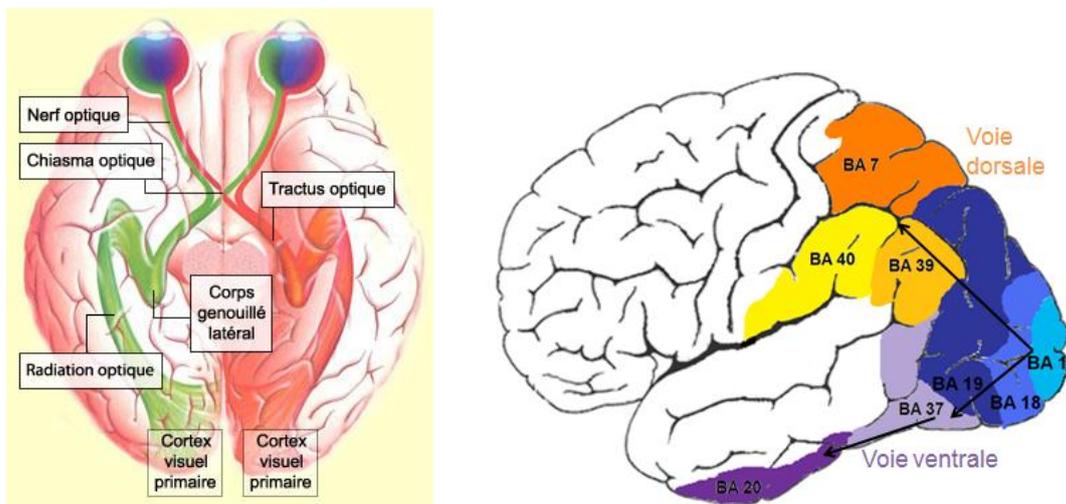


Figure 1a. (à gauche) Représentation de la voie visuelle partant de la rétine jusqu'au cortex visuel primaire.

(issu de: [http://lecerveau.mcgill.ca/flash/d/d\\_02/d\\_02\\_cr/d\\_02\\_cr\\_vis/d\\_02\\_cr\\_vis.html](http://lecerveau.mcgill.ca/flash/d/d_02/d_02_cr/d_02_cr_vis/d_02_cr_vis.html)).

Figure 1b. (à droite) Représentation des deux voies visuelles partant de V1: la voie ventrale et la voie dorsale.

Les traitements sous-tendus par les voies ventrale et dorsale apportent donc des informations complémentaires, sur l'identité et les caractéristiques spatiales des stimuli visuels. Ces informations sont cruciales lors de la reconnaissance des stimuli écrits, qui requiert à la fois une identification de l'identité des lettres ainsi que le recueil d'informations précises concernant l'ordre des lettres. La coopération des voies ventrale et dorsale est donc

primordiale pour le traitement des stimuli écrits. L'objectif de ce projet de recherche est d'étudier les différents processus sous-tendus par les deux voies lors de la reconnaissance visuelle des mots chez les lecteurs dyslexiques. Cet aspect a été particulièrement exploré dans les expériences 1 et 2.

L'implication de ces deux voies dans le traitement des caractères langagiers se mettrait en place progressivement au cours de l'apprentissage de la lecture. La théorie du recyclage neuronal (Dehaene & Cohen, 2007) propose que la réalisation d'activités culturelles comme la lecture ou l'arithmétique repose sur une conversion des systèmes corticaux préexistants. Ainsi, les structures cérébrales initialement sollicitées lors du traitement visuel des objets se spécialiseraient progressivement dans la reconnaissance des lettres et des mots. Une comparaison entre des adultes ayant appris à lire tardivement (i.e., des anciens illettrés) et des illettrés a montré que l'apprentissage de la lecture, bien que tardif, s'accompagne de différences anatomiques au sein de la voie ventrale ainsi que de plusieurs structures de la voie dorsale (i.e., le gyrus supramarginal gauche et le gyrus angulaire; Carreiras, Seghier, Baquero, Estévez, Lozano, Devlin, & Price, 2009). Ces structures seraient donc directement influencées par l'apprentissage de la lecture. Les sections suivantes détaillent les implications respectives des voies ventrale et dorsale dans la reconnaissance visuelle des mots ainsi que les traitements qu'elles sous-tendent chez les lecteurs experts et chez les lecteurs dyslexiques.

## **Partie 1. La reconnaissance visuelle des mots chez les lecteurs experts**

### **I. L'expertise pour le traitement de l'écrit au niveau de la voie ventrale**

La reconnaissance visuelle des mots consiste à établir une correspondance entre la forme physique d'un mot et sa représentation mentale stockée en mémoire. Suite aux premières étapes de traitement visuel, les modèles ont décrit deux voies d'accès au lexique ou deux procédures de lecture. La voie indirecte (McClelland & Rumelhart, 1981) ou voie sublexicale (Coltheart et al., 2001; Perry et al., 2007), ou la procédure analytique (Ans et al., 1998), repose sur une médiation phonologique et sera détaillée ultérieurement. La voie directe (McClelland & Rumelhart, 1981) ou voie lexicale (Coltheart et al., 2001; Perry et al., 2007), ou la procédure globale (Ans et al., 1998), permet une reconnaissance rapide et en parallèle de l'ensemble des lettres qui composent les mots. Ce traitement orthographique implique à la fois l'analyse de l'identité des lettres et de leur position. Les mots sont alors reconnus directement à partir de leur forme visuelle.

Des études de cas ont mis en évidence une implication majeure du cortex occipito-temporal gauche dans la reconnaissance en parallèle des mots écrits. Des lésions de cette structure ou de ses connexions ont en effet été associées à des altérations massives du traitement rapide des mots écrits. De telles lésions sont responsables du syndrome d'alexie pure, un déficit sélectif de la lecture touchant des individus lettrés (Binder & Mohr, 1992; Cohen, Martinaud, Lemer, Lehericy, Samson, Obadia, Slachevsky, & Dehaene, 2003; Damasio & Damasio, 1983). Le premier cas d'alexie pure a été rapporté par Déjerine en 1892 (Déjerine, 1892). Selon la taille et la localisation de la lésion, la reconnaissance visuelle des mots peut être altérée à différents degrés. Les déficits peuvent en effet aller d'une incapacité totale à reconnaître des lettres isolées à un simple ralentissement du traitement des stimuli écrits lorsqu'un décodage lettre à lettre est encore possible. Le déficit touche sélectivement les

stimuli écrits et n'affecte pas la reconnaissance d'autres catégories de stimuli visuels, tels que des objets, des dessins, ou des chiffres. La production et la compréhension du langage parlé ainsi que l'écriture sont également préservés.

Des études d'imagerie à résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) ont montré que le traitement des stimuli écrits sollicite plus particulièrement la partie médiane du gyrus fusiforme gauche et ont identifié ses coordonnées précises (Figure 2; AB 37; coordonnées de Talairach:  $x=-43$ ,  $y=-54$ ,  $z=-12$ ; Cohen, Dehaene, Naccache, Lehéricy, Dehaene-Lambertz, Hénaff, & Michel, 2000). Cette localisation ne varie que de quelques millimètres d'un sujet à l'autre et est reproductible à travers les différents systèmes d'écriture, qu'ils reposent ou non sur des caractères alphabétiques et quel que soit le sens de traitement des stimuli écrits (Bolger, Perfetti, & Schneider, 2005; Cohen, Lehéricy, Chochon, Lemer, Rivaud, & Dehaene, 2002; Fu, Chen, Smith, Iversen, & Matthews, 2002; Price & Devlin, 2003; Reinholz & Pollman, 2005).

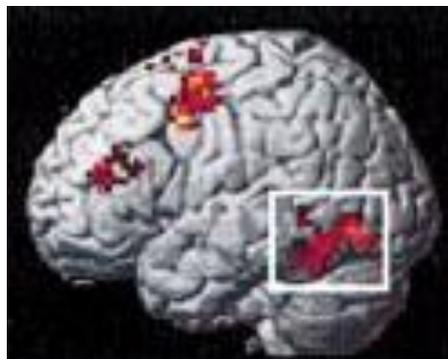


Figure 2. Activation de la partie médiane du gyrus fusiforme gauche en réponse à des stimuli écrits (issu de Cohen et al., 2002).

Ce premier ensemble d'études s'accorde sur le rôle majeur du gyrus fusiforme gauche dans le traitement des stimuli écrits. Certains travaux se sont attachés à déterminer la fonction précise de cette structure.

## **1. La fonction du gyrus fusiforme gauche**

S'il est admis que le gyrus fusiforme gauche joue un rôle majeur dans le traitement des stimuli écrits, sa fonction exacte reste encore débattue à ce jour.

Certains travaux ont montré que le gyrus fusiforme gauche ne s'active pas uniquement en réponse à des stimuli écrits mais également pour d'autres catégories de stimuli visuels. Des activations de cette structure ont en effet été décrites dans des tâches de dénomination ou de jugement sémantique d'images (Murtha, Chertkow, Beauregard, & Evans, 1999). Des études ont même montré que l'activation du gyrus fusiforme gauche n'est pas spécifique à la modalité visuelle. Des implications de cette structure ont en effet été rapportées suite à la présentation auditive de mots (Yoncheva, Zevin, Maurer, & McCandliss, 2010a) ou pour le décodage du braille par des sujets aveugles (Büchel, Price, & Friston, 1998). En résumé, ces travaux indiquent que la fonction du gyrus fusiforme gauche ne se limiterait pas à la reconnaissance visuelle des mots écrits. Cette structure occuperait une fonction plus globale d'intégration de l'information sensorielle (Price & Devlin, 2003, 2011). Le gyrus fusiforme gauche permettrait de transmettre les inputs sensoriels vers les autres régions cérébrales. Au moment de la réception de l'information sensorielle, ces régions généreraient automatiquement un feedback vers le gyrus fusiforme gauche. Ces feedbacks consisteraient en des prédictions basées sur l'expérience antérieure et permettraient de faciliter le traitement des inputs sensoriels. Lors de la reconnaissance visuelle des mots, le gyrus fusiforme gauche servirait de zone d'intégration entre les afférences sensorielles provenant des stimuli écrits et les feedbacks des régions pariétales et frontales sous-tendant le traitement phonologique et sémantique.

D'autres travaux soutiennent en revanche une spécialisation fonctionnelle du gyrus fusiforme gauche pour le traitement des stimuli écrits. L'hypothèse du recyclage neuronal (Dehaene & Cohen, 2007) postule que le gyrus fusiforme gauche, initialement sollicité par l'ensemble des stimuli visuels, se spécialiserait progressivement pour la reconnaissance des stimuli écrits. Cette structure présente les propriétés idéales pour l'analyse des caractères du langage écrit avec: 1) des champs récepteurs sensibles aux faibles différences de formes qui permettent de distinguer les lettres et 2) des connexions privilégiées avec les aires temporales, pariétales et frontales impliquées dans les traitements phonologique et sémantique. L'exposition répétée aux caractères écrits au cours de l'apprentissage de la lecture s'accompagnerait d'une conversion du gyrus fusiforme gauche pour la reconnaissance des formes des lettres et des mots. Un premier argument en faveur de l'hypothèse du recyclage neuronal au sein du gyrus fusiforme gauche provient de travaux d'IRMf réalisés chez des lecteurs experts. L'activité de cette structure a été comparée en réponse à la présentation de stimuli visuels langagiers (i.e., des lettres) et non langagiers, tels que des damiers (Cohen et al., 2002) ou des chiffres (Polk, Stallcup, Aguirre, Alsop, D'Esposito, Detre, & Farah, 2002) dans des tâches de vision passive ou de jugement de similarité visuelle entre des paires d'items. Les résultats ont montré un accroissement de l'activité du gyrus fusiforme gauche suite à la présentation des lettres relativement aux autres catégories de stimuli visuels. Chez les lecteurs experts, le gyrus fusiforme gauche serait donc sollicité de façon privilégiée pour le traitement des stimuli écrits. Des études développementales d'IRMf comparant des individus âgés de 7 à 18 ans (Shaywitz, Shaywitz, Pugh, Mencl, Fulbright, Skudlarski, Constable, Marchione, Fletcher, Lyon, & Gore, 2002) ou comparant des enfants avec des adultes (Booth, Burman, Van Santen, Harasaki, Gitelman, Parrish, & Mesulam, 2001) soutiennent également l'hypothèse du recyclage neuronal. Les résultats ont en effet révélé une implication croissante du gyrus fusiforme gauche lors du traitement des stimuli écrits avec l'âge. De plus, le degré

d'activité du gyrus fusiforme gauche était positivement corrélé avec le niveau de lecture (Shaywitz et al., 2002). Ces travaux montrent ainsi que la spécialisation du gyrus fusiforme gauche pour la reconnaissance des stimuli écrits se développe au fur et à mesure de l'expérience et est à l'origine de l'acquisition d'un niveau de lecture expert. En plus de ces études réalisées chez des enfants et chez des adultes normolecteurs, un dernier argument soutenant l'hypothèse du recyclage neuronal provient de résultats obtenus chez des adultes illettrés et ex-illettrés (Dehaene, Pegado, Bragan, Ventura, Nunes Filho, Jobert, Deahene-Lambertz, Kolinsky, Morais, & Cohen, 2010). Les activations cérébrales ont été comparées en réponse à différentes catégories de stimuli visuels (i.e., des stimuli écrits, des visages, des maisons, des outils et des damiers) entre des adultes illettrés, ex-illettrés ou lettrés présentant différents niveaux de lecture. Les résultats ont montré que l'activation ainsi que la sélectivité des réponses du gyrus fusiforme gauche pour les stimuli écrits par rapport aux autres stimuli visuels augmente avec le niveau de lecture. Les activations du gyrus fusiforme gauche étaient en effet réduites pour des stimuli visuels non orthographiques tels que des visages ou des damiers chez les sujets présentant les niveaux de lecture les plus élevés relativement aux sujets présentant des niveaux de lecture inférieurs ou étant illettrés. Le gyrus fusiforme gauche, initialement impliqué dans la reconnaissance d'une grande variété de stimuli visuels, se spécialiserait donc pour le traitement des stimuli écrits au cours de l'apprentissage de la lecture.

Plusieurs fonctions concernant l'analyse du langage écrit ont été associées au gyrus fusiforme gauche. Il a tout d'abord été montré que cette structure sous-tend une reconnaissance invariante des lettres. Le traitement des mots implique une reconnaissance experte des caractères écrits, indépendante de changements parfois majeurs de leur forme visuelle (e.g., taille, couleur, police de caractère, casse...). Il a été proposé qu'une

représentation abstraite des lettres, que l'on appelle la forme visuelle des mots (Cohen et al., 2000; Warrington & Shallice, 1980), serait stockée au niveau du gyrus fusiforme gauche. Les activations de cette structure en réponse aux stimuli écrits ne varieraient pas en fonction de la forme physique des lettres. Il a ainsi été montré que les activations du gyrus fusiforme gauche ne sont pas sensibles à des modifications de la casse (Dehaene, Naccache, Cohen, Bihan, Mangin, Poline, & Rivière, 2001). La mise en place d'une représentation abstraite, regroupant les différentes versions d'une même lettre, est à l'origine d'une reconnaissance invariante de la forme visuelle des lettres. Ceci a conduit à l'appellation de cette structure occipito-temporale gauche 'l'aire de la forme visuelle des mots' (i.e., the 'Visual Word Form Area', VWFA; Cohen et al., 2000).

En plus de sous-tendre la reconnaissance des représentations abstraites des lettres, le gyrus fusiforme gauche est également impliqué dans le traitement des associations de lettres. La fréquence d'association des lettres dans le langage correspond à la redondance orthographique. L'exposition répétée à l'écrit s'accompagne d'un apprentissage implicite des régularités statistiques des séquences de lettres (Pacton, Perruchet, Fayol, & Cleeremans, 2001; Seidenberg & McClelland, 1989). De nombreux travaux ont mis en évidence des effets de redondance orthographique chez des lecteurs experts. L'effet de fréquence du premier bigramme (i.e., la fréquence d'association des deux premières lettres d'un mot) sur la reconnaissance visuelle des mots a été investigué en décision lexicale (Conrad, Carreiras, Tamm, & Jacobs, 2009). Les performances ont été comparées entre des mots commençant par un premier bigramme fréquent et des mots commençant par un premier bigramme rare. Les résultats ont montré un effet facilitateur de la fréquence du premier bigramme sur la reconnaissance visuelle des mots: les mots commençant par un premier bigramme fréquent étaient reconnus plus rapidement et généraient moins d'erreurs que les mots commençant par un premier bigramme rare. L'idée avancée est qu'un bigramme fréquent activerait plus

rapidement et plus fortement les représentations lexicales qu'un bigramme rare, facilitant ainsi la reconnaissance des mots. D'autres travaux ont montré que la perception (en conjonction illusoire; Doignon & Zagar, 2005; Doignon-Camus, Zagar, & Mathey, 2009) ou l'activation (en décision lexicale; Mahé, Bonnefond, & Doignon-Camus, 2013; Mathey, Zagar, Doignon, & Seigneuric, 2006) de certaines unités sublexicales fortement impliquées dans la reconnaissance visuelle des mots (i.e., les syllabes), est influencée par les propriétés statistiques de la redondance orthographique. Les régularités statistiques du langage écrit joueraient donc un rôle déterminant dans la reconnaissance visuelle des mots. Cette sensibilité à la fréquence d'association des lettres a pu être mesurée sur l'activation du gyrus fusiforme gauche. Les activations de cette structure ont été comparées en réponse à des groupes de lettres fréquemment ou rarement associées au moyen de tâches de détection visuelle (Binder, Medler, Westbury, Liebenthal, & Buchaman, 2006; Vinckier, Dehaene, Jobert, Dubus, Sigman, & Cohen, 2007). Davantage d'activations du gyrus fusiforme gauche ont été rapportées pour des groupes de lettres fréquemment associées par rapport à des groupes de lettres plus rarement associées. La sensibilité à la fréquence d'association des lettres était en outre spécifique au gyrus fusiforme gauche. Cette structure permettrait donc non seulement un traitement expert des lettres mais aussi des groupes de lettres qui forment les mots. La possibilité de reconnaître rapidement des groupes de lettres fréquemment associées aurait un impact sur la reconnaissance visuelle des mots. L'effet de longueur des mots permet d'illustrer cette capacité à traiter simultanément les groupes de lettres qui composent les mots. Une étude a examiné cet effet chez des enfants français âgés de 7 à 11 ans (Aghababian & Nazir, 2000). Chez les lecteurs débutants (i.e., à 7 ans), les latences de lecture augmentaient linéairement avec le nombre de lettres des mots. Ce résultat traduit un décodage lent, au cours duquel toutes les lettres qui composent le mot doivent être traitées les unes après les autres. Une disparition de l'effet de longueur des mots a en revanche été observée au bout de

quelques années d'apprentissage de la lecture (i.e., à 11 ans). L'absence de l'effet de longueur des mots est aussi observé chez des adultes normolecteurs, quelle que soit la consistance de la langue (i.e., en espagnol; Acha & Perea, 2008; en français; Bijeljac-Babic, Millogo, Farioli, & Grainger, 2004; en anglais; New, Ferrand, Pallier, & Brysbaert, 2006). La pratique de la lecture s'accompagnerait donc de la mise en place d'une reconnaissance visuelle des mots rapide et en parallèle. Ce traitement en parallèle est rendu possible par la spécialisation progressive du gyrus fusiforme gauche pour le traitement des lettres et des groupes de lettres qui forment les mots.

Enfin, la question de la sensibilité du gyrus fusiforme gauche aux effets de lexicalité est controversée. Certains travaux suggèrent une fonction limitée aux aspects prélexicaux. Des études ont en effet rapporté des activations similaires du gyrus fusiforme gauche pour des mots et des pseudomots dans une tâche de détection de répétition (Dehaene, Le Clec'H, Poline, Le Bihan, & Cohen, 2002). D'autres travaux soutiennent en revanche une sensibilité de l'activation du gyrus fusiforme gauche aux aspects lexicaux. Une méta-analyse a tout d'abord rapporté un effet de lexicalité sur l'activation du gyrus fusiforme gauche. Cette structure présentait en effet davantage d'activations pour des pseudomots relativement à des mots (Mechelli, Gorno-Tempini, & Price, 2003). Cet effet de lexicalité a été répliqué dans une tâche de lecture silencieuse (Kronbichler, Hutzler, Wimmer, Mair, Staffen, & Ladurner, 2004). Cette étude a également rapporté un effet de fréquence lexicale sur l'activité du gyrus fusiforme gauche, avec davantage d'activations pour des mots rares que pour des mots fréquents. Une relation inverse est donc observée entre l'activité du gyrus fusiforme gauche et la fréquence lexicale des stimuli écrits. Moins d'activation serait requise pour traiter des stimuli familiers relativement à des stimuli rares ou nouveaux. Ces effets pourraient varier en fonction de la tâche utilisée. Un effet de lexicalité opposé, avec davantage d'activations pour des mots que pour des pseudomots, a en effet été rapporté dans des tâches de décision lexicale

et rattaché à l'accès aux représentations sémantiques (Binder, McKiernan, Parsons, Westbury, Possing, Kaufman, & Buchanan, 2003).

En définitive, bien que sa fonction exacte soit encore débattue, de nombreux arguments expérimentaux soutiennent un rôle prépondérant du gyrus fusiforme gauche dans la reconnaissance des stimuli écrits.

## **2. L'organisation anatomique du gyrus fusiforme gauche**

L'activité du gyrus fusiforme gauche a entre autres fonctions été associée à la reconnaissance invariante de l'identité des lettres et des groupes de lettres fréquemment associées. Des travaux ont rattaché ces deux processus à des localisations anatomiques distinctes. Des études d'amorçage ont tout d'abord montré que seule la partie la plus antérieure du gyrus fusiforme gauche est sensible aux séquences de lettres récurrentes, telles que des morphèmes ou des mots courts (Dehaene, Jobert, Naccache, Ciuciu, Poline, Le Bihan, & Cohen, 2004). Une autre étude d'IRMf a enregistré les activations du gyrus fusiforme gauche en réponse à des stimuli écrits présentant différents degrés de proximité avec des mots réels (i.e., des séquences de faux caractères ou de lettres rares ou récurrentes variant dans leur fréquence d'association; Vinckier et al., 2007). Les activations cérébrales ont été comparées entre des régions postérieures et antérieures du gyrus fusiforme gauche. La région la plus postérieure du gyrus fusiforme gauche était activée de façon similaire par tous les types de stimuli. La région la plus antérieure était en revanche davantage sollicitée par les stimuli ressemblant le plus à des mots réels. Le traitement des caractères langagiers au sein du gyrus fusiforme gauche suivrait donc un gradient postéro-antérieur. La reconnaissance des lettres impliquerait les régions les plus postérieures du gyrus fusiforme gauche tandis que les groupes de lettres solliciteraient les régions plus antérieures. Un gradient postéro-antérieur similaire a été mis en évidence en chinois (Chan, Tang, Tang, Lee, Lo, & Kwong, 2009). La

spécialisation du cortex occipito-temporal gauche pour le traitement des stimuli écrits ne serait donc pas une spécificité des langages alphabétiques mais serait commune à l'ensemble des systèmes d'écriture. La mise en place du gradient de spécialisation du gyrus fusiforme gauche aurait lieu au cours de l'apprentissage de la lecture, comme le montrent des différences mesurées en IRMf entre des enfants et des adultes dans une tâche de détection visuelle (Olulade, Flowers, Napoliello, & Eden, 2012). La région présentant davantage de sélectivité pour les mots réels était plus postérieure chez les enfants relativement aux adultes. La mise en place de traitements spécialisés pour les mots demanderait donc une certaine expérience en lecture.

L'organisation postéro-antérieure du gyrus fusiforme gauche a été prise en compte dans le modèle des détecteurs de combinaisons locales ('Local Combination Detectors', LCD) proposé par Dehaene, Cohen, Sigman et Vinckier (2005). Ce modèle propose une organisation hiérarchique du traitement des stimuli écrits non seulement au sein du gyrus fusiforme gauche mais également au niveau des structures chargées du traitement visuel de bas niveau (Figure 3). Le plus bas niveau de traitement du modèle LCD se situe dans le corps genouillé latéral, une structure sensible aux contrastes locaux. L'information est ensuite envoyée au cortex visuel primaire (V1, AB 17), qui répond à des barres orientées, puis au cortex visuel secondaire (V2, AB 18), qui traite des fragments de formes (i.e., des fragments de lettres dans le cas des stimuli écrits). La reconnaissance des formes, telles que les lettres, est ensuite réalisée au sein du cortex visuel associatif (V4, AB 19). A ce niveau, des populations de neurones différentes sont nécessaires pour reconnaître tous les formats de présentation possibles d'une même lettre (e.g., des changements de taille, de couleur, de police de caractère, de casse...). Lors de ces premières étapes de traitement, communes à l'ensemble des stimuli visuels, l'analyse a lieu dans l'hémisphère controlatéral à leur localisation dans le champ visuel.

L'analyse se poursuit ensuite au sein du gyrus fusiforme gauche, dans les 150/200 ms suivant la présentation des stimuli. Une représentation abstraite des lettres serait codée au niveau le plus postérieur (V8). Des associations de lettres non adjacentes puis des bigrammes (i.e., associations de lettres adjacentes) seraient reconnues plus antérieurement. Ce n'est qu'au dernier stade, dans la partie la plus antérieure du gyrus fusiforme gauche, à proximité du sillon occipito-temporal, que se mettrait en place une reconnaissance de séquences de lettres récurrentes, telles que des morphèmes ou des mots courts.

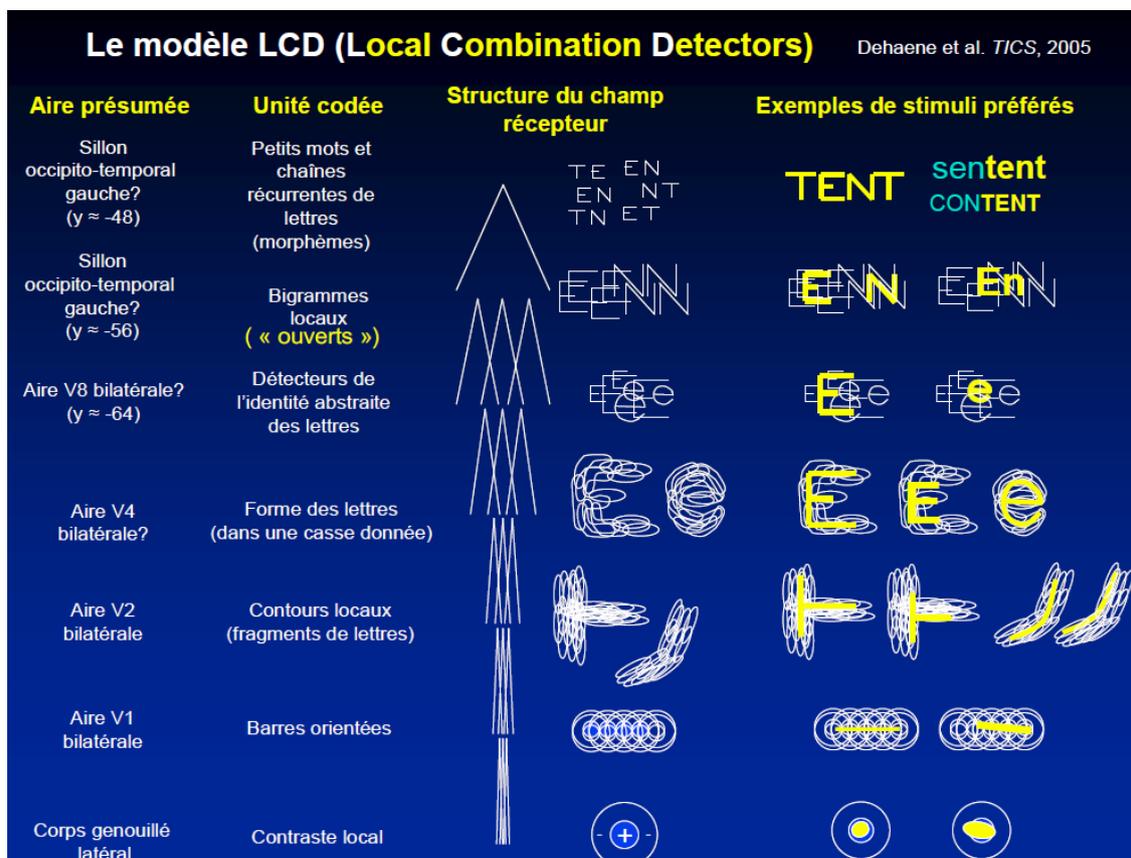


Figure 3. Le modèle LCD (issu de Dehaene et al., 2005).

En tenant compte de l'organisation anatomique hiérarchique du système visuel et du gyrus fusiforme gauche, le modèle LCD a ainsi associé chacune des étapes du traitement de la

forme visuelle des mots écrits à un substrat neuro-anatomique. La temporalité des étapes de la reconnaissance visuelle des mots a pu être précisée grâce à des études électrophysiologiques.

### **3. L'apport des études électrophysiologiques.**

Les travaux électrophysiologiques ont apporté des informations précises concernant la succession temporelle des étapes de la reconnaissance visuelle des mots. Des études réalisées en magnétoencéphalographie (MEG) ont ainsi montré une différenciation précoce, dès 150 ms, du traitement de séquences de lettres par rapport à des séquences de symboles (Tarkiainen, Helenius, Hansen, Cornelissen, & Salmelin, 1999) ou à des visages au sein du cortex occipito-temporal inférieur (Tarkiainen, Cornelissen, & Salmelin, 2002). La spécialisation des traitements cérébraux en fonction du type de stimuli visuels présentés se ferait donc de façon très précoce.

Des études de potentiels évoqués (Event Related Potentials, ERP) ont associé un composant, la N170, au traitement expert de certaines catégories de stimuli visuels. Ce composant est enregistré environ 150 ms après la présentation d'un stimulus au niveau de sites occipito-temporaux. Des travaux ont comparé l'amplitude de la N170 en réponse à des stimuli d'expertise relativement à des stimuli visuels contrôles. De nombreuses études ont alors montré de plus larges amplitudes de ce composant dans l'hémisphère droit pour des visages (Rossion, Joyce, Garrison Cottrell, & Tarr, 2003) ou en bilatéral pour des objets (Rossion et al., 2003) relativement à des stimuli visuels contrôles dans des tâches de jugement d'orientation. Certaines études ont même montré un accroissement de l'amplitude du composant N170 pour des objets d'expertise (tels que des images d'oiseaux ou de voitures) chez des experts de ces types de stimuli dans des tâches de jugement de catégorie (Gauthier, Curran, Curby, & Collins, 2003; Tanaka & Curran, 2001). La spécialisation du composant N170 pour le traitement des stimuli visuels familiers s'appliquerait également aux stimuli

écrits. De nombreux travaux ont montré de plus larges amplitudes du composant N170 dans l'hémisphère gauche pour des stimuli écrits relativement à des stimuli visuels contrôles tels que des séquences de symboles chez des lecteurs experts adultes dans des tâches de détection de cibles (Bentin, Mouchetant-Rostaing, Giard, Echallier, & Pernier, 1999) ou de détection de répétition (Brem, Bucher, Halder, Summers, Dietrich, Martin, & Brandeis, 2006; Maurer, Brem, Bucher, & Brandeis, 2005a; Maurer & McCandliss, 2007). Des résultats similaires ont été obtenus en décision lexicale en comparant des stimuli écrits orthographiques (i.e., des mots et des pseudomots) par rapport à des caractères non orthographiques (i.e., des mots écrits en arabes; Simon, Bernard, Lalonde, & Rebaï, 2006). Contrairement aux autres catégories de stimuli visuels, tels que les visages ou les objets, la spécialisation du composant N170 pour le traitement des stimuli écrits est latéralisée à gauche. De plus, le composant N170 a été associé à l'activité du gyrus fusiforme gauche dans des études combinant IRMf et ERP (Brem et al., 2006; Maurer et al., 2005a). L'ensemble de ces travaux s'accorde sur la spécialisation du composant N170 pour le traitement des stimuli écrits. Comme pour les études d'IRMf mesurant l'activité du gyrus fusiforme gauche, la sensibilité du composant N170 aux effets lexicaux est débattue. Des effets de fréquence lexicale et de lexicalité ont déjà été rapportés, mais la présence de ces effets varie d'une étude à l'autre et pourrait dépendre du type de tâche utilisée (Maurer & McCandliss, 2007). Dans l'ensemble, l'étude de la spécialisation du composant N170 a mis en évidence une reconnaissance experte particulièrement précoce (i.e., environ 150 ms après la présentation des stimuli) des stimuli écrits chez des sujets adultes normolecteurs.

De nombreux travaux suggèrent que la spécialisation du composant N170 se met en place au cours de l'apprentissage de la lecture. Des études ont montré une absence de spécialisation du composant N170 pour l'écrit chez des prélecteurs (i.e., des enfants de 6.5 ans; Maurer et al., 2005a; Maurer, Brem, Kranz, Bucher, Benz, Halder, Steinhausen, &

Brandeis, 2006; Maurer, Brem, Bucher, Kranz, Benz, Steinhausen, & Brandeis, 2007). Cette spécialisation a en revanche été rapportée dans les deux ans qui suivent le début de l'apprentissage de la lecture (i.e., chez des enfants de 8.5 ans; Maurer et al., 2007). L'acquisition de la lecture s'accompagne donc de modifications des activations corticales avec la mise en place de traitements spécialisés pour les stimuli écrits. D'autres études ont même montré que la spécialisation du composant N170 continue à évoluer avec la pratique de la lecture. Des enfants ont été suivis de façon longitudinale deux ans et cinq ans après le début de l'apprentissage de la lecture (Maurer, Schulz, Brem, van der Mark, Bucher, Martin, & Brandeis, 2011). D'autres travaux ont aussi comparé des enfants et des adultes (Maurer et al., 2006). Dans les deux cas, les résultats ont montré une réduction de la spécialisation du composant N170 chez les lecteurs les plus expérimentés par rapport aux lecteurs débutants. La trajectoire de développement suit ainsi une courbe en U inversée plutôt qu'une augmentation linéaire. De plus, les lecteurs les plus expérimentés présentaient de plus courtes latences du composant N170, suggérant une analyse plus rapide et automatique de l'information. Enfin, un accroissement de la latéralisation gauche du composant N170 était observé avec l'âge, traduisant la mise en place progressive d'un réseau cortical latéralisé à gauche pour le traitement des stimuli écrits avec l'expertise en lecture. Ces études développementales renforcent l'idée que l'apprentissage et la pratique de la lecture s'accompagnent de la mise en place d'un traitement spécialisé des stimuli écrits. Le composant N170 est considéré comme un corrélât électrophysiologique d'une certaine expertise pour les stimuli écrits, indiquant un traitement visuel rapide des séquences de lettres.

L'acquisition d'un niveau de lecture expert dépend donc de la spécialisation du gyrus fusiforme gauche pour le traitement rapide et automatique des stimuli écrits. D'autres structures cérébrales interagissent avec le gyrus fusiforme gauche lors du traitement des

stimuli écrits. Certaines de ces structures sont localisées au niveau de la voie dorsale et soutiennent des processus attentionnels et phonologiques qui jouent un rôle majeur dans la reconnaissance visuelle des mots notamment au moment de l'apprentissage de la lecture. Ces aspects sont détaillés dans les sections suivantes.

## **II. Les processus attentionnels et phonologiques au niveau de la voie dorsale**

Des structures de la voie dorsale sous-tendent des processus attentionnels et phonologiques impliqués dans la reconnaissance visuelle des mots. Les processus attentionnels sollicités lors du traitement des stimuli écrits ont été associés au cortex pariétal postérieur (AB 39-40, Peyrin, Démonet, N'Guyen-Morel, Le Bas, & Valdois, 2010; Vidyasagar & Pammer, 2010) ainsi qu'au lobule pariétal supérieur (AB 7, Peyrin et al., 2010) en bilatéral. Alors que le traitement attentionnel sollicite des structures de la voie dorsale en bilatéral, le traitement phonologique implique exclusivement des structures de l'hémisphère gauche: les gyri angulaire (AB 39) et supramarginal (AB 40) du lobule pariétal inférieur (Pugh, Mencl, Jenner, Katz, Frost, Lee, Shaywitz, & Shaywitz, 2001). Les sections suivantes décrivent le rôle des processus attentionnels et phonologiques lors de la reconnaissance visuelle des mots ainsi que leurs corrélats anatomiques et électrophysiologiques.

### **1. Les processus attentionnels dans la reconnaissance visuelle des mots**

L'implication de l'attention lors de la reconnaissance visuelle des mots est relativement peu considérée dans la plupart des modèles. Certains modèles accordent néanmoins une place centrale à l'attention lors du traitement des stimuli écrits. Laberge et Samuels (1974) postulent ainsi l'existence d'un centre attentionnel, qui jouerait un rôle critique au moment de l'apprentissage de la lecture. Lors du traitement d'un stimulus écrit, l'attention sous-tendrait non seulement l'activation des représentations de lettres appropriées, mais aussi l'association de ces lettres avec leurs représentations phonologiques. Chez les lecteurs experts, l'ensemble de ces traitements pourrait être réalisé automatiquement, sans implication de l'attention. Un peu plus tard, Laberge et Brown (1989) ont identifié deux composants de l'attention visuo-

spatiale particulièrement sollicités lors de la reconnaissance visuelle des mots: l'orientation de l'attention vers la cible à traiter et l'inhibition des informations adjacentes. Ces deux processus attentionnels interviendraient lors de l'analyse en parallèle et de l'analyse sérielle des stimuli écrits. Dans ce projet de recherche, nous avons plus particulièrement étudié l'implication de l'orientation de l'attention et de l'inhibition dans la reconnaissance visuelle des mots (études 4 et 5). Ces deux aspects sont donc développés dans les sections suivantes.

Un autre modèle, plus récent, accorde une place prépondérante au traitement attentionnel lors de la reconnaissance visuelle des mots chez les lecteurs débutants et chez les lecteurs expérimentés: le modèle MTM proposé par Ans et collaborateurs (1998). Ce modèle intègre une fenêtre visuo-attentionnelle. Cette fenêtre permet de délimiter l'empan visuo-attentionnel, c'est-à-dire la quantité d'éléments visuels pouvant être traités simultanément. Dans le cadre de la reconnaissance visuelle des mots, cet empan correspond à la quantité d'unités orthographiques distinctes qui peuvent être traitées en une fixation oculaire dans une séquence de lettres (Bosse, Tainturier, & Valdois, 2007). Il a été montré que les tâches mesurant l'empan visuo-attentionnel sollicitent des structures cérébrales bilatérales de la voie dorsale: les cortex pariétaux supérieur (AB 7) et postérieur (AB 40, Peyrin et al., 2010).

Les capacités d'empan visuo-attentionnel ont été directement associées au traitement expert des stimuli écrits, et ce à la fois chez l'enfant et l'adulte. Des études longitudinales menées chez des enfants âgés de 7, 9 et 11 ans ont tout d'abord montré que les capacités d'empan visuo-attentionnel sont prédictives des habiletés de lecture (Bosse & Valdois, 2009). Cette influence s'observait en outre indépendamment de l'impact d'autres prédicteurs importants comme la conscience phonologique (i.e., une aptitude métalinguistique qui se définit comme la compréhension que le langage oral peut se décomposer en sons). Les capacités d'empan visuo-attentionnel influenceraient donc directement l'apprentissage de la

lecture. Chez les lecteurs experts adultes, une étude a montré que les habiletés à traiter simultanément des séquences de symboles sont corrélées positivement aux capacités à traiter des stimuli écrits en décision lexicale (Pammer, Lavis, Cooper, Hansen, & Cornelissen, 2005). Les auteurs concluent que certaines capacités visuo-spatiales pré-orthographiques seraient impliquées lors de l'analyse des mots écrits.

Les capacités d'empan visuo-attentionnel occuperaient donc une place majeure lors de la reconnaissance visuelle des mots. Dans le modèle MTM, deux procédures, qui diffèrent par la taille de la fenêtre visuo-attentionnelle, peuvent être impliquées lors de la reconnaissance visuelle des mots: la procédure globale et la procédure analytique. Lors de la procédure globale, la fenêtre visuo-attentionnelle s'ajuste à la longueur du mot à lire de sorte que l'ensemble des lettres qui le composent est traité simultanément. La procédure globale est surtout impliquée pour les mots familiers. L'échec de cette procédure, lors du traitement de mots nouveaux par exemple, induit la mise en place de la procédure analytique. Dans ce cas, la fenêtre visuo-attentionnelle se réduit à des unités plus petites, telles que des syllabes ou des graphèmes. Chaque unité est alors décodée de façon séquentielle. Dans ce modèle, l'attention est donc impliquée quelle que soit la procédure utilisée.

En résumé, certains modèles tiennent compte d'une influence de l'attention visuo-spatiale lors du traitement des stimuli écrits. Les sections suivantes décrivent plus particulièrement l'influence des deux processus décrits par Laberge & Brown (1989): l'orientation attentionnelle et l'inhibition.

### **1.1.L'orientation attentionnelle et l'inhibition lors du traitement des stimuli écrits**

Laberge & Brown (1989) postulent que l'identification d'un mot, même familier, sollicite des processus attentionnels. Il serait nécessaire dans un premier temps d'orienter rapidement

son attention vers le mot cible, de façon à faciliter son traitement. La sélection du mot à traiter implique également d'inhiber toute interférence provenant des mots adjacents dans le texte.

Sur ces deux processus, la plupart des travaux de la littérature se sont intéressés au rôle de l'orientation de l'attention lors de la reconnaissance visuelle des mots. De nombreuses études ont montré que la façon dont l'attention s'oriente sur les stimuli écrits a un impact sur leur identification. L'étude des effets d'amorçage subliminal de répétition a tout d'abord montré un impact de l'orientation attentionnelle sur le traitement des lettres (Marzouki, Grainger, & Theeuwes, 2007). Des effets facilitateurs d'amorces subliminales congruentes ont uniquement été rapportés pour des amorces présentées dans une localisation spatiale attendue dans une tâche de décision alphabétique. L'influence de l'orientation attentionnelle a également été décrite lors de la reconnaissance de mots écrits. Des études reposant sur des tâches de dénomination (Auclair & Siéoff; 2002) ou de décision lexicale (McCann, Folk, & Johnston, 1992; Ortells, Tudela, Noguera, & Abad, 1998) ont ainsi montré que des mots sont mieux traités lorsqu'ils apparaissent dans une région de l'espace où l'attention a été dirigée par un indice spatial par rapport à une autre région du champ visuel. Des effets facilitateurs d'amorçage subliminal de répétition et sémantique ont également été rapportés lorsqu'une amorce congruente apparaît dans une localisation spatiale attendue dans une tâche de décision sémantique (Lien, Ruthruff, Kouchi, & Lachter, 2010). Dans l'ensemble, ces travaux montrent une influence de l'orientation attentionnelle sur le traitement des stimuli écrits familiers.

L'implication de l'inhibition lors de la reconnaissance visuelle des mots est illustrée à travers les travaux ayant étudié l'effet de masquage latéral ou de 'crowding' entre des lettres adjacentes (Bouma, 1970). L'effet de masquage latéral se définit comme l'altération de la reconnaissance d'une cible à cause de l'interférence produite par les stimuli adjacents. Il a ainsi été montré qu'une lettre est mieux reconnue présentée seule qu'entourée de lettres

adjacentes. Le masquage latéral se produirait au cours des premières étapes d'analyse visuelle, avant que les lettres ne soient identifiées (Huckauf, Heller, & Nazir, 1999). L'effet de masquage latéral est connu pour être influencé par trois facteurs: le distance du stimulus par rapport au point de fixation, la distance entre les lettres adjacentes et la similarité visuelle entre les lettres. Cet effet illustre l'importance de l'inhibition des lettres adjacentes lors du traitement des séquences de lettres.

Des études réalisées en Stimulation Magnétique Transcranienne (TMS) soutiennent l'implication de l'attention visuo-spatiale lors du traitement des mots écrits. Des travaux ont consisté à inactiver des structures de la voie dorsale telles que l'aire temporale moyenne (V5) dans une tâche de détection de mots (Laycock, Crewther, Fitzgerald, & Crewther, 2009) ou le cortex pariétal postérieur droit (Coordonnées de Talairach: +48, -42, +56) dans une tâche de dénomination de mots (Braet & Humphreys, 2006). L'aire temporale moyenne est une structure de la voie dorsale qui projette vers le cortex pariétal postérieur droit, classiquement associé aux processus d'attention visuo-spatiale et notamment à l'orientation attentionnelle (gyrus angulaire; Chambers, Payne, Stokes, & Mattingley, 2012; Yin, Zhao, Evans, Fan, Ge, Tang, Khundrakpam, Wang, & Liu, 2012). Les résultats ont montré des altérations du traitement de mots écrits suite aux inactivations appliquées à ces deux structures. Ces données ont été interprétées comme le signe d'une implication de ces structures pour le recrutement de processus attentionnels lors la reconnaissance des mots écrits.

## **1.2.Le traitement sériel des stimuli écrits: implication de l'attention visuo-spatiale**

L'orientation de l'attention vers la cible à traiter et l'inhibition des informations adjacentes seraient également sollicitées lors de l'analyse sérielle des stimuli écrits non familiers (Lalonde & Brown, 1989). Dans cette situation, l'attention se focaliserait sur les unités sublexicales connues des séquences de lettres, telles que des lettres ou des groupes de

lettres. La mise en place de procédures de traitement distinctes entre les mots familiers et les stimuli écrits non familiers est illustrée par l'effet de longueur des mots. Chez des lecteurs experts, le traitement des mots familiers est peu influencé par leur longueur, suggérant une reconnaissance rapide et en parallèle de ce type de stimuli (New et al., 2006). En revanche, pour les stimuli écrits non familiers (i.e., des pseudomots), des augmentations linéaires des latences de lecture en fonction du nombre de lettres sont classiquement rapportées dans des tâches de dénomination (Juphard, Carbonnel, Ans, & Valdois 2006; Weekes, 1997; Ziegler, Perry, Jacobs, & Braun, 2001). Cet effet de longueur des mots traduit la mise en place d'une analyse sérielle, décrite dans certains modèles. Le modèle MTM (Ans et al., 1998) associe ainsi aux stimuli écrits non familiers une procédure de traitement analytique. Lors de cette procédure, la taille de la fenêtre visuo-attentionnelle n'englobe pas l'ensemble du mot mais se réduit au premier groupe de lettres qui le compose (e.g., la première syllabe comme LA dans LAMIR). Une fois que ce premier groupe de lettres est décodé, la fenêtre visuo-attentionnelle s'ajuste au groupe de lettres suivant (e.g., MIR dans LAMIR). La fenêtre visuo-attentionnelle se déplace ainsi successivement sur les différentes unités qui composent le mot jusqu'à ce que l'ensemble de la séquence soit traitée. Enfin, le modèle CDP+ (Perry et al., 2007) décrit également une forte implication du déplacement attentionnel lors du traitement des stimuli écrits non familiers.

Des études de patients ayant des lésions bilatérales du cortex pariétal soutiennent l'implication de l'attention visuo-spatiale lors du décodage de stimuli écrits non familiers. Ces patients présentent en effet des altérations marquées du traitement de pseudomots ou d'items dont le format visuel a été dégradé comme des mots présentés en miroir, ayant subi une rotation, écrits en polices de caractères alternées, ou avec un accroissement de l'espace entre les lettres (Hall, Humphreys, & Cooper, 2001; Vinckier, Naccache, Papeix, Forget, Hahn-Barma, Dehaene, & Cohen, 2006). Ce type d'items ne peut pas être traité en parallèle et

nécessite la mise en place d'un décodage sériel, qui est compromis par les lésions pariétales de ces patients. Le traitement des stimuli écrits présentés de façon inhabituelle (i.e., verticalement) est également particulièrement altéré suite à l'inactivation du cortex pariétal postérieur droit par TMS (Braet & Humphreys, 2006).

Un autre argument en faveur d'une implication privilégiée du traitement attentionnel lors du décodage sériel provient d'études menées chez des lecteurs experts. De nombreux travaux comportementaux soulignent tout d'abord une implication accrue de l'attention lors du traitement de séquences de lettres non familières (e.g., des pseudomots) par rapport à des mots connus (Auclair & Siéoff, 2002; Siéoff & Posner, 1988). Des études d'IRMf ont ensuite rapporté une implication des structures sous-tendant le traitement attentionnel lors du décodage de stimuli écrits non familiers. Une tâche de décision lexicale phonologique a révélé que l'effet de longueur de mots observé sur les pseudomots s'accompagne de l'activation de structures occipito-pariétales et pariétales bilatérales (Schurz, Sturm, Richlan, Kronbichler, Ladurner, & Wimmer, 2010). Ces activations étaient absentes pour des mots familiers, qui seraient analysés en parallèle quelle que soit leur longueur. De plus, une récente méta-analyse a associé le cortex pariétal postérieur droit au traitement des pseudomots (Cattinelli, Borghese, Galluci, & Paulesu, 2012). D'autres études d'imagerie cérébrale ont montré des activations du cortex pariétal postérieur droit (Mayall, Humphreys, Mechelli, Olson, & Price 2001; Pammer, Hansen, Holliday, & Cornelissen 2006) ou bilatéral (Cohen, Dehaene, Vinckier, Jobert, & Montavont, 2008) pour l'analyse de mots présentés dans des formats visuels inhabituels, tels que des mots écrits dans des polices de caractères alternées, verticalement, ou avec une augmentation de l'espace entre les lettres. Il a été suggéré que comme pour les pseudomots, le traitement en parallèle des mots est compromis lorsque la présentation d'un mot familier s'écarte trop du format visuel standard. Une récente étude a évalué les procédures de traitement sollicitées lors de l'analyse de stimuli écrits présentant

différents degrés de dégradation (Cohen et al., 2008). Les résultats ont montré que l'analyse en parallèle des stimuli écrits n'est plus possible à partir d'un certain seuil de dégradation de leur format de présentation (i.e., plus de deux espaces entre les lettres, une rotation supérieure à 45°). Un effet de longueur de mots ainsi que des activations pariétales étaient observées pour ces stimuli, indiquant un décodage sériel.

En résumé, les travaux réalisés chez les patients atteints de lésions de la voie dorsale et les lecteurs experts témoignent d'une implication majeure de l'attention visuo-spatiale lors du décodage sériel des stimuli écrits. Des études se sont intéressées plus particulièrement à l'influence de l'attention visuo-spatiale sur la reconnaissance des stimuli écrits au niveau du gyrus fusiforme gauche.

### **1.3.L'influence de l'attention visuo-spatiale sur l'activité du gyrus fusiforme gauche**

Lors du décodage sériel des stimuli écrits, le cortex pariétal postérieur est sollicité pour la segmentation des séquences de lettres en groupes de lettres (Vidyasagar, 1999). Une fois qu'un groupe de lettres est identifié et sélectionné, un feedback est envoyé du cortex pariétal postérieur (Figure 4), avec une implication du cortex préfrontal (Bar, Kassam, Ghuman, Boshyan, Schmidt, Dale, Hämäläinen, Marinkovic, Schacter, Rosen, & Halgren, 2006; Kanwisher & Wojciulik, 2000), vers les aires visuelles primaires ainsi que vers les structures occipito-temporales ventrales, dont l'analyse s'oriente sur ces stimuli (Bullier, 2001; Somers, Dale, Seiffert, & Tootell, 1999; Vidyasagar, 1999). L'activité du gyrus fusiforme gauche serait donc directement influencée par les processus d'attention visuo-spatiale sous-tendus par la voie dorsale.

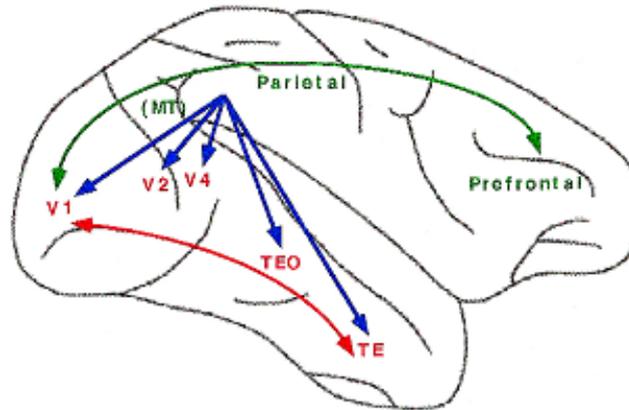


Figure 4. Représentation schématique du feedback envoyé du cortex pariétal postérieur vers les aires visuelles primaires et la voie ventrale (issu de Vidyasagar, 1999).

Un premier argument en faveur de cette influence provient du fait que le traitement des stimuli écrits implique les structures de la voie dorsale plus précocement que celles de la voie ventrale. La transmission de l'information est en effet plus rapide au niveau de la voie magnocellulaire, qui aboutit dans la voie dorsale, qu'au niveau de la voie parvocellulaire, qui aboutit dans la voie ventrale (Bullier, 2001; Laycock, Crewther, & Crewther, 2007). De plus, une récente étude d'ERP a montré que le décodage sériel de stimuli écrits présentés dans un format inhabituel (i.e., vertical) impliquait plus précocement le cortex occipito-pariétal en bilatéral que le cortex occipito-temporal gauche (Rosazza, Cai, Minati, Paulignan, & Nazir, 2009). L'orientation de l'attention, un des processus de l'attention visuo-spatiale impliqué dans la reconnaissance visuelle des mots, est classiquement associé à des composants ERP particulièrement précoces. Ce processus attentionnel a en effet été associé au complexe P100/N100. Ces deux composants sont générés entre 75 et 200 ms post-stimulus au niveau des cortex extrastrié, occipito-temporal et occipito-pariétal (Gomez Gonzalez, Clark, Fan, Luck, & Hillyard, 1994; Yamazaki, Kamijo, Kenmochi, Fukuzumi, Kiyuna, Takaki, & Kuroiwa, 2000). La P100 a été associée à la facilitation de l'analyse sensorielle des stimuli

présentés dans une localisation spatiale attendue (Hillyard, Teder-Sälejärvi, & Münte, 1998; Luck, Heinze, Mangun, & Hillyard, 1990). La N100 reflète de son côté l'orientation de l'attention et la facilitation du traitement des items jugés pertinents pour la tâche à réaliser (Luck et al., 1990). Ces deux composants ont jusqu'à présent été très peu étudiés avec du matériel verbal.

D'autres travaux ont décrit une influence directe du traitement attentionnel sous-tendu par le cortex pariétal postérieur sur l'activité du gyrus fusiforme gauche. Des travaux d'IRMf ont ainsi montré que l'implication du cortex pariétal postérieur lors de l'analyse de stimuli écrits dégradés s'accompagne d'une diminution (Deng, Guo, Ding, & Peng, 2012) ou d'une modification de la zone d'activation du cortex occipito-temporal gauche (Cohen et al., 2008). Des études d'ERP ont également rapporté des modulations attentionnelles du composant N170, associé au traitement rapide et automatique des stimuli écrits au sein du gyrus fusiforme gauche. Les résultats de ces études montrent de plus larges amplitudes du composant N170 en réponse à des mots après un indiçage spatial (McCarthy & Nobre, 1993), un amorçage de catégorie (Aranda, Madrid, Tudela, & Ruz, 2010), ou un amorçage du type de traitement à réaliser (Ruz et Nobre, 2008). D'autres résultats ont rapporté de plus larges amplitudes du composant N170 lorsque la charge attentionnelle est élevée (Martin, Thierry, & Démonet, 2010). Cet ensemble de données témoigne de l'influence précoce de l'attention visuo-spatiale sur les premières étapes d'analyse des mots familiers. Lors du décodage sériel, la reconnaissance des lettres au sein du gyrus fusiforme gauche dépendrait donc d'un input adéquat du cortex pariétal postérieur. Un défaut de la segmentation des séquences de lettres en groupes de lettres pourrait en effet perturber l'identification des lettres au sein de la voie ventrale (Vidyasagar & Pammer, 2010).

Le décodage sériel est non seulement sollicité chez le lecteur expert, lors du traitement des stimuli écrits non familiers, mais aussi de façon privilégiée lors de l'apprentissage de la

lecture, avant qu'un traitement expert de l'écrit ne soit possible au niveau du gyrus fusiforme gauche. Sur cette base, il a été suggéré que la reconnaissance experte des caractères écrits au niveau de la voie ventrale dépendrait en grande partie des interactions avec le système dorsal, fortement sollicité durant la période d'apprentissage de la lecture (Cohen & Dehaene, 2009; Pugh et al., 2001). Une récente étude permet d'illustrer ces interactions (Vogel, Miezin, Petersen, & Schlaggar, 2012). Les résultats ont révélé de fortes corrélations entre l'activité du gyrus fusiforme gauche et celle de structures dorsales sous-tendant le traitement attentionnel. De plus, cette relation augmentait avec l'âge et les capacités de lecture, soulignant l'importance des processus attentionnels pour l'acquisition d'un niveau de lecture expert.

L'analyse des stimuli écrits dépendrait donc d'une interaction entre les voies dorsale et ventrale. Ces interactions sont particulièrement importantes lors du processus de décodage sériel, qui sollicite dans un premier temps une sélection visuo-attentionnelle au niveau de la voie dorsale et dans un second temps une reconnaissance visuelle au sein de la voie ventrale. L'information est ensuite transmise vers les aires cérébrales chargées du traitement phonologique (Cohen & Dehaene, 2009). Cet aspect est détaillé dans la partie suivante.

## **2. Les processus phonologiques dans la reconnaissance visuelle des mots**

Le traitement phonologique joue également un rôle majeur dans la reconnaissance visuelle des mots. Les modèles à double voie associent le traitement phonologique à une voie indirecte (McClelland & Rumelhart, 1981) ou voie sublexicale (Coltheart et al., 2001; Perry et al., 2007). Alors que la voie directe permet d'accéder aux représentations lexicales à partir de la forme visuelle des mots, la voie indirecte repose sur une médiation phonologique. De nombreux travaux suggèrent en effet une influence majeure du traitement phonologique lors de la reconnaissance visuelle des mots.

### **2.1.L'activation des représentations phonologiques**

Une activation rapide et automatique des représentations phonologiques lors du traitement des stimuli écrits a été rapportée. Des études reposant sur le paradigme d'amorçage masqué ont ainsi montré que des amorces reliées phonologiquement au mot cible (e.g., lont-LONG) facilitent sa reconnaissance par rapport à des amorces contrôles qui présentent uniquement une similarité orthographique (e.g., lonc-LONG; Ferrand & Grainger, 1992; Frost, 1998; Lukatela & Turvey, 1994). Les représentations phonologiques sont donc activées suffisamment rapidement au cours du traitement des mots écrits pour influencer leur reconnaissance. Des études ont rapporté un effet d'amorçage phonologique sur l'activation de structures de l'hémisphère gauche associées au traitement phonologique: le gyrus temporal supérieur ainsi que le gyrus supramarginal, une structure de la voie dorsale située dans le cortex pariétal inférieur (Wilson, Tregellas, Slason, Pasko, & Rojas, 2011). Des activations du cortex pariétal inférieur gauche ont par ailleurs été rapportées de façon constante lors du traitement de mots familiers (Menard, Kosslyn, Thompson, Alpert, & Rauch, 1996; Vanderberghe, Price, Wise, Josephs, & Frackowiak, 1996). Il est intéressant de souligner que l'ensemble de ces travaux repose sur des tâches de décision lexicale ou de dénomination, qui ne demandent pas de traitement phonologique explicite. L'activation des représentations phonologiques est donc un processus automatique au cours du traitement des stimuli écrits, même pour des items familiers qui pourraient être reconnus sans médiation phonologique. En effet, une fois activées, les représentations orthographiques activent simultanément les représentations lexicales et phonologiques. Les représentations phonologiques peuvent donc avoir un impact sur le traitement des mots écrits avant qu'ils ne soient reconnus à partir de la voie directe.

Les unités phonologiques représentées dans la plupart des modèles de lecture sont les phonèmes (Coltheart et al., 2001; McClelland & Rumelhart, 1981; Perry et al., 2007), bien que certains modèles se soient centrés sur les syllabes. C'est le cas des modèles MTM (Ans et al., 1998) et IAS (Mathey et al., 2006). Certains travaux ont en effet montré une influence majeure des unités phonologiques syllabiques lors du traitement des stimuli écrits. Les arguments proviennent de résultats obtenus à partir du paradigme des conjonctions illusoires en anglais (Prinzmetal, Treiman, & Rho, 1986) et en français (Doignon & Zagar, 2005) et réalisés en décision lexicale en espagnol (Carreiras, Alvarez, & de Vega, 1993), en allemand (Conrad & Jacobs, 2004), en français (Mahé et al., 2013; Mathey & Zagar, 2002) et en anglais (Macizo & Van Petten, 2007).

La précocité de l'influence des représentations phonologiques sur la reconnaissance visuelle des mots a été particulièrement illustrée dans des études d'ERP. En français, un effet des unités syllabiques sur le traitement des stimuli écrits a été décrit dès 150 ms après leur présentation dans une tâche de conjonctions illusoires (Doignon-Camus, Bonnefond, Touzalain-Chrétien, & Dufour, 2009). Des effets de congruence syllabique ont aussi été montrés sur le composant antérieur N100 en anglais dans une tâche de décision lexicale (Ashby, 2010) et dès 185 ms après la présentation de stimuli écrits en italien dans une tâche de décision phonologique sur des sites postérieurs (Proverbio & Zani, 2003). Ces résultats soulignent une activation rapide des représentations phonologiques lors de la reconnaissance visuelle des mots. Des effets de fréquence syllabique ont également été décrits sur des sites antérieurs dans des tâches de décision lexicale en espagnol (Barber, Vergara, & Carreiras, 2004) et en allemand (Hutzler, Bergmann, Conrad, Kronbichler, Stenneken, & Jacobs, 2004). Les résultats ont en effet montré des modulations du composant P200, associé à l'activation syllabique, et du composant N400, associé au traitement sémantique, en fonction de la fréquence de la première syllabe des mots. Ces deux études montrent donc à la fois une

activation rapide des représentations phonologiques à partir de l'écrit et un effet de cette activation sur la compétition lexicale.

## **2.2.Le traitement sériel: décodage phonologique**

Les travaux mentionnés dans la section précédente montrent une influence des représentations phonologiques sur la reconnaissance visuelle des mots, même lorsque ces derniers sont familiers et ne nécessitent pas de décodage sériel. D'autres catégories de stimuli écrits sollicitent un traitement sériel. C'est le cas des mots nouveaux, des pseudomots (Juphard, et al., 2006; Weekes, 1997; Ziegler et al., 2001), ou des mots dont le format visuel de présentation a été dégradé (Cohen et al., 2008), pour lesquels un effet de longueur des mots est classiquement rapporté. Ce traitement sériel sollicite non seulement d'importants processus attentionnels mais aussi un décodage phonologique. Certains modèles associent à la voie indirecte un traitement sériel (Coltheart et al., 2001; Perry et al., 2007), reposant sur une association successive de chaque lettre ou groupe de lettres composant la séquence à sa représentation phonologique (i.e., des phonèmes ou des syllabes). La séquence de lettres est dans un premier temps segmentée en groupes de lettres. Une fois que le premier groupe de lettres est reconnu visuellement, l'étape suivante consiste à associer ce groupe de lettres à sa forme phonologique. Le traitement se poursuit ensuite avec le groupe de lettres suivant jusqu'à ce que toute la séquence soit décodée. La voie indirecte joue donc un rôle majeur dans le décodage des stimuli écrits non familiers qui ne peuvent pas être reconnus directement à partir de leur forme visuelle.

Des études de cas ont souligné l'importance du traitement phonologique lors du décodage des stimuli écrits non familiers. Des patients présentant des hypoperfusions ou des lésions de structures dorsales impliquées dans le traitement phonologique (i.e., les gyri supramarginal et angulaire gauches) présentent en effet des troubles de conversion graphèmes-phonèmes ainsi

que des difficultés à lire des pseudomots (Hillis, Wityk, Tuffiash, Beauchamp, Jacobs, Barker, & Selnes, 2001). A l'inverse, en appliquant des TMS à haute fréquence au niveau du cortex pariétal inférieur gauche, de façon à le sur-activer, une amélioration significative des performances en lecture de pseudomots a pu être observée chez des lecteurs experts (Costanzo, Menghini, Caltagirone, Oliveri, & Vicari, 2012). Il est intéressant de noter que les sur-activations du cortex pariétal inférieur gauche n'avaient aucun effet sur le traitement de mots familiers, ce type d'items pouvant être reconnu sans intervention obligatoire d'un décodage phonologique.

De nombreuses études ont également montré chez des normolecteurs une implication prépondérante du cortex pariétal inférieur gauche, fortement associé au traitement phonologique, suite à la présentation de mots rares ou de pseudomots (Price, Wise, & Frackowiak, 1996; Pugh et al., 2001) relativement à des mots familiers lors de tâches de détection de forme ou de jugement sémantique. Une récente méta-analyse a confirmé l'implication privilégiée du cortex pariétal inférieur gauche lors du traitement des pseudomots (Catinelli et al., 2012). Le rôle du cortex pariétal inférieur gauche pour des stimuli écrits dont le traitement requiert d'importants processus phonologiques a aussi été rapporté dans des orthographe non alphabétiques, tel que le japonais. Davantage d'activations des gyri angulaire et supramarginal gauches en réponse à des caractères Kana (impliquant davantage de traitement phonologique) que Kanji ont ainsi été montrées (Law, Kanna, Fujita, Lassen, Miura, & Uemura, 1991). De façon similaire à la reconnaissance de la forme visuelle des mots au sein du gyrus fusiforme gauche, le traitement phonologique met en jeu des mécanismes cérébraux qui ne varient pas en fonction du système d'écriture. Enfin, d'autres structures ont été associées au traitement des pseudomots: la partie postérieure du gyrus temporal supérieur ainsi que le gyrus frontal inférieur gauche (Pugh et al., 2001). Concernant les fonctions plus précises de l'ensemble de ces structures, il a été suggéré que le gyrus

supramarginal gauche, en coopération avec le gyrus frontal inférieur gauche, sous-tendrait l'association des codes orthographiques en codes phonologiques. Ces structures, en coopération avec le gyrus angulaire, permettraient également l'association des représentations phonologiques avec les systèmes de connaissances sémantiques (Pugh, Frost, Sandak, Landi, Moore, Della Porta, Rueckl, & Mencl, 2011).

La conversion graphèmes-phonèmes, sollicitée lors du décodage sériel, a été associée à un composant apparaissant entre 250 et 400 ms suite à la présentation des stimuli dans des tâches de décision de rimes ou de décision phonologique, de vision passive ou de décision lexicale (Bentin et al., 1999; Proverbio, Vecchi, & Zani, 2004; Simon, Bernard, Largy, Lalonde, & Rebaï, 2004; Simon et al., 2006). En fonction de sa latence, ce composant a été appelé N320 (Bentin et al., 1999; Simon et al., 2004; Simon et al., 2006) ou N280 (Proverbio et al., 2004). Ce composant est maximal au niveau de sites temporo-pariétaux et serait généré au niveau de structures temporales et du cortex pariétal inférieur gauche (Simon et al., 2004). De façon concordante avec sa fonction, le composant N280/N320 présente habituellement de plus larges amplitudes pour des stimuli prononçables (e.g., des mots et des pseudomots), impliquant un décodage phonologique, relativement à des stimuli écrits non prononçables (e.g., des séquences de consonnes ou des caractères arabes), pour lesquels ce processus n'est pas sollicité (Bentin et al., 1999; Proverbio et al., 2004; Simon et al., 2006).

L'ensemble des travaux des deux dernières sections montrent un rôle majeur des représentations phonologiques dans la reconnaissance visuelle des mots. Le traitement phonologique aurait notamment une implication cruciale lors du décodage sériel de stimuli non familiers. Un décodage sériel est non seulement mis en place chez le lecteur expert lors du traitement de stimuli écrits non familiers mais est également la procédure de lecture privilégiée au moment de l'apprentissage de la lecture, lorsque l'ensemble des stimuli écrits

est nouveau. La section suivante détaille l'implication du décodage phonologique pour l'acquisition d'un niveau de lecture expert.

### **2.3.L'acquisition des correspondances lettres-sons et la spécialisation du gyrus fusiforme gauche**

Certaines habiletés phonologiques occupent une place centrale au moment de l'apprentissage de la lecture. C'est le cas de la conscience phonologique, une capacité métalinguistique qui permet de reconnaître, d'identifier et de manipuler les unités phonologiques (i.e., les phonèmes, les syllabes, les rimes) des mots. La conscience phonologique est considérée comme un des meilleurs prédicteurs des capacités ultérieures de lecture (Torgesen, Wagner, & Rashotte, 1994). En ce qui concerne le décodage phonologique, les modèles d'apprentissage de la lecture soulignent le rôle déterminant de l'acquisition des correspondances lettres-sons durant l'apprentissage de la lecture sur les capacités ultérieures de reconnaissance rapide des stimuli écrits (Doignon-Camus & Zagar, 2009; in press; Grainger & Ziegler, 2011; Harm & Seidenberg, 2004; Seidenberg & McClelland, 1989; Ziegler & Goswami, 2005). Des études inter-langues, qui ont évalué l'impact de la transparence orthographique, supportent cette idée. Alors que dans les orthographe transparentes un groupe de lettres ne peut avoir qu'une prononciation (e.g., en italien ou en espagnol), dans les orthographe opaques un graphème peut avoir des prononciations multiples (e.g., la lettre A en anglais se prononce différemment dans les mots *cat*, *was*, *saw*, *made* ou *car*) de même qu'un phonème peut avoir des transcriptions différentes (e.g., le son /o/ en français peut s'écrire *o*, *au*, ou *eau*). Une étude inter-langues européenne a mesuré les performances en lecture de mots et de non-mots chez des enfants de différentes nationalités (Seymour, Aro, & Erskine, 2003). Les résultats ont montré qu'au bout d'un an d'apprentissage de la lecture, les performances en lecture de mots et de pseudomots étaient

proches du niveau maximum pour les orthographe transparentes (e.g., en grecque, finois, allemand, italien et espagnol), intermédiaires pour des orthographe présentant des inconsistances lettres-sons (e.g., en danois) ou sons-lettres (e.g., en français), et très inférieures pour les orthographe présentant des inconsistances dans les deux sens (i.e., en anglais). L'acquisition des correspondances lettres-sons serait plus facile dans les orthographe transparentes que dans les orthographe opaques, ce qui aurait un impact sur l'apprentissage de la lecture.

La théorie du mapping phonologique (i.e., phonological mapping theory; McCandliss & Noble, 2003; Pugh et al., 2001; Pugh et al., 2011) postule que l'acquisition des correspondances lettres sons jouerait un rôle déterminant pour l'émergence d'un traitement expert de l'écrit au niveau de la voie ventrale. Un argument en faveur de cette hypothèse provient de corrélations positives entre les habiletés de décodage et le degré d'activation du cortex temporal inférieur gauche chez des individus âgés de 7 à 18 ans (Shaywitz et al., 2002). La théorie du mapping phonologique a récemment été étendue à la spécialisation du composant N170 pour le traitement des stimuli écrits (i.e., la différence stimuli écrits/symboles; Maurer & McCandliss, 2007). Cette spécialisation dépendrait des associations graphèmes-phonèmes acquises durant l'apprentissage de la lecture. Deux études d'ERP soutiennent l'influence de l'apprentissage des correspondances lettres-sons sur la spécialisation du composant N170. La première étude a montré une spécialisation de la N170 pour l'écrit chez des enfants prélecteurs après un entraînement centré sur l'apprentissage des correspondances lettres-sons (Brem, Bach, Kucian, Guttorm, Martin, Lyytinen, Brandeis, & Richardson, 2010). La seconde étude a rapporté une spécialisation du composant N170 en réponse à un langage artificiel chez des adultes ayant suivi un entraînement focalisé sur les associations graphèmes-phonèmes (Yoncheva, Blau, Maurer, & McCandliss, 2010b). Dans les deux études, la spécialisation du composant N170 était absente chez les groupes de sujets

ayant suivi des entraînements n'impliquant pas de mise en correspondance lettres-sons. Ces résultats soutiennent l'hypothèse selon laquelle l'expertise pour le traitement des stimuli écrits résulterait de l'apprentissage des associations entre les lettres et les sons qui leur sont rattachés.

## **Conclusion**

La reconnaissance visuelle des mots repose sur l'interaction des voies ventrale et dorsale. La spécialisation du gyrus fusiforme gauche pour le traitement des stimuli écrits serait cruciale pour l'acquisition d'un niveau de lecture expert. De plus, cette spécialisation dépendrait fortement des interactions avec les structures de la voie dorsale sous-tendant des processus attentionnel (i.e., le cortex pariétal postérieur et supérieur) et phonologique (i.e., les gyri angulaire et supramarginal gauches). Des lésions au sein de ces structures cérébrales sont responsables de troubles acquis de la lecture. Ainsi, des lésions du gyrus fusiforme gauche compromettent la reconnaissance rapide et en parallèle des mots tandis que des lésions du cortex pariétal postérieur droit et du cortex pariétal inférieur gauche induisent des difficultés de décodage sériel. Les troubles développementaux de la lecture, tels que la dyslexie développementale, pourraient être liés à un défaut de mise en place de ces réseaux cérébraux au cours de l'apprentissage de la lecture.

## **Partie 2. La reconnaissance visuelle des mots chez les lecteurs dyslexiques**

La dyslexie développementale est un trouble des apprentissages qui a pour la première fois été décrit sous le terme de ‘cécité verbale congénitale’ (Hinshelwood, 1917; Morgan, 1896; Stephenson, 1907) et qui se définit comme un déficit spécifique de l’acquisition de la lecture, ne pouvant pas être expliqué par un retard intellectuel, des troubles d’ordre sensoriel ou neurologique ou des facteurs environnementaux tel qu’un défaut d’éducation ou un niveau socioculturel insuffisant (Rapport d’Expertise INSERM 2007). La dyslexie se rapporte plus spécifiquement à un trouble de reconnaissance exacte et/ou fluente des mots écrits.

Compte tenu de la forte prévalence de la dyslexie dans la population (i.e., 3 à 7 % de la population; Lindgren, De Renzi, & Richman, 1985), de nombreuses théories explicatives ont été développées pour tenter de comprendre les mécanismes cognitifs sous-jacents à ce déficit. Des troubles du traitement visuel ont tout d’abord été rapportés comme étant à l’origine de la dyslexie (Dunlop, 1972; Hallgren, 1950; Orton, 1937). Dès les années 1970 cependant, l’hypothèse d’une origine phonologique de la dyslexie a été avancée et est progressivement devenue prédominante (Ramus & Szenkovits, 2008; Snowling, 2000; Vellutino, 1979). Parallèlement, des théories alternatives ont été développées. Des déficits attentionnels ont ainsi été rapportés, tels que des troubles du déplacement rapide de l’attention (Hari & Renvall, 2001) ou de l’empan visuo-attentionnel (Bosse et al., 2007). A côté de ces déficits phonologiques et attentionnels, d’autres hypothèses ont été proposées: la théorie d’un déficit du traitement temporel rapide (Tallal, Miller, & Fitch, 1993), la théorie magnocellulaire (Stein & Walsh, 1997), la théorie cérébelleuse (Nicolson, & Fawcett, 1990; Nicolson, Fawcett, & Dean, 2001) ou encore la théorie d’un déficit d’ancrage (Ahissar, M., 2007).

En résumé, le trouble central de la dyslexie se rapporte à une altération de la reconnaissance rapide des mots. Les deux théories principales de la dyslexie (i.e., la théorie

d'un déficit phonologique et la théorie d'un déficit attentionnel) concernent deux processus fortement impliqués dans le décodage sériel des stimuli écrits. Les sections suivantes détaillent les principaux résultats de la littérature relativement au traitement en parallèle et au décodage sériel des stimuli écrits chez les lecteurs dyslexiques.

## **I. Une expertise pour le traitement écrit chez les lecteurs dyslexiques?**

### **1. Défaut d'expertise visuelle pour l'écrit et corrélats neuro-anatomiques**

Le trouble central des lecteurs dyslexiques est un déficit de reconnaissance exacte et/ou fluente des stimuli écrits. De nombreux travaux ont rapporté que contrairement aux normolecteurs, l'apprentissage de la lecture ne s'accompagne pas du passage d'un décodage lent et sériel des mots à un traitement rapide et en parallèle chez les lecteurs dyslexiques. La mesure de l'effet de longueur des mots permet d'appréhender cette transition. Des résultats ont ainsi montré un effet de longueur des mots massif chez des lecteurs débutants de 7 ans (i.e., grade 1) alors que cet effet était presque inexistant chez des lecteurs plus expérimentés âgés de 8 et 9 ans (i.e., grades 2 et 3; Zoccolotti, de Luca, di Pace, Gasperini, Judica, & Spinelli, 2005). En revanche, des sujets dyslexiques âgés de 9 ans présentaient toujours un effet marqué de longueur des mots. L'apprentissage de la lecture ne s'accompagnerait donc pas de la mise en place d'un traitement rapide et en parallèle des mots chez les lecteurs dyslexiques. Des travaux mesurant les mouvements oculaires ont fourni un argument supplémentaire en faveur de cette conclusion. Il a été montré que la durée des fixations ainsi que le nombre de saccades oculaires augmentent en fonction de la longueur des mots dans une tâche de dénomination chez des enfants de 10 ans (Dürrwächter, Sokolov, Reinhard, Klosinski, & Trauzettel-Klosinski, 2010). Ces résultats étaient exacerbés dans le groupe de sujets dyslexiques, témoignant d'une difficulté à analyser les stimuli écrits longs et à ajuster les mouvements oculaires en fonction de la longueur des stimuli écrits. Les sujets dyslexiques prendraient en compte des unités plus petites pour traiter les stimuli écrits, ce qui souligne l'absence de mise en place d'une reconnaissance en parallèle, qui repose sur des unités plus larges.

Ce défaut du traitement rapide et en parallèle des mots pourrait être sous-tendu par une altération de la spécialisation du gyrus fusiforme gauche. D'une part, la persistance de l'effet de longueur des mots manifesté par les lecteurs dyslexiques est une caractéristique commune avec les patients présentant une dyslexie acquise suite à des lésions du cortex occipito-temporal gauche (Cohen et al., 2003). D'autre part, une étude d'IRMf a associé les effets massifs de longueur des mots de sujets dyslexiques âgés de 16 à 20 ans à une sous-activation ainsi qu'une absence de modulation de l'activité du gyrus fusiforme gauche en réponse à la longueur des stimuli écrits dans une tâche de décision lexicale phonologique (Richlan, Sturm, Schurz, Kronbichler, Ladurner, & Wimmer, 2010). Une récente méta-analyse a confirmé ce profil de sous-activation du cortex occipito-temporal gauche chez des dyslexiques adultes (Richlan, Kronbichler, & Wimmer, 2009). Les sous-activations étaient particulièrement marquées au niveau de la localisation de la VWFA. Des études de tomographie par émission de positons (PET scan) ont rapporté de façon constante une réduction de l'activité du gyrus fusiforme gauche chez des adultes dyslexiques dans des tâches de lecture ou de traitement orthographique (Brunswick, McCrory, Price, Frith, & Frith, 1999; McCrory, Mechelli, Frith, & Price, 2005; Rumsey, Nace, Donohue, Wise, Maisog, & Andreason, 1997). Des résultats comparables ont été décrits en IRMf chez des adultes (Shaywitz, Shaywitz, Pugh, Fulbright, Constable, Mencl, Shankweiler, Liberman, Skudlarski, Fletcher, Katz, Marchione, Lacadie, Gatenby, & Gore, 1998) et des enfants dyslexiques (Shaywitz et al., 2002). Des corrélations positives entre le degré d'activation du cortex occipito-temporal gauche et le traitement de mots et de pseudomots écrits ont en outre été établies chez les enfants (Shaywitz et al., 2002). Les altérations des activations du cortex occipito-temporal gauche lors du traitement des stimuli écrits seraient donc directement reliées aux troubles de lecture des dyslexiques. Des études inter-langues ont en outre montré que les sous-activations occipito-temporales gauches des sujets dyslexiques observées dans des tâches de lecture ne varient pas en fonction de

l'opacité de la langue (i.e., français, anglais, italien; Paulesu, Démonet, Fazio, McCrory, Chanoine, Brunswick, Cappa, Cossu, Habib, Frith, & Frith, 2001) ni du système d'écriture (i.e., des caractères alphabétiques ou non, anglais vs. chinois; Hu, Lee, Zhang, Liu, Geng, Seghier, Shakeshaft, Twomey, Green, Yang, & Price, 2010). Une altération du fonctionnement du gyrus fusiforme gauche a donc été proposée comme un corrélat neuro-anatomique de la dyslexie.

En plus de ces sous-activations, une absence du gradient de spécialisation postéro-antérieur au sein du gyrus fusiforme gauche a été montrée chez des enfants dyslexiques dans une tâche de décision lexicale phonologique (Van der Mark, Bucher, Maurer, Schulz, Brem, Buckelmüller, Kronbichler, Loenneker, Klaver, Martin, & Brandeis, 2009). Ainsi, seuls les normolecteurs présentaient des activations accrues du gyrus fusiforme gauche antérieur pour des stimuli écrits et des régions postérieures pour des faux caractères. De plus, un effet de lexicalité sur l'activité du gyrus fusiforme gauche, avec un accroissement de l'activité pour des mots relativement à des pseudomots, était uniquement présent chez les sujets contrôles. La spécialisation du gyrus fusiforme gauche pour le traitement des stimuli écrits ainsi que la sensibilité de cette structure à l'effet de lexicalité sont donc absents chez les lecteurs dyslexiques. Deux études ont montré que cette altération du traitement des stimuli écrits ne se généralise pas à l'ensemble des stimuli visuels chez des enfants dyslexiques de 10 ans (Monzalvo, Fluss, Billard, Dehaene, & Dehaene-Lambertz, 2012) et chez des adolescents dyslexiques de 15 ans (Kronschnabel, Schmid, Maurer, & Brandeis, 2013) dans des tâches de détection visuelle. La première étude a mis en évidence des diminutions de l'activité du gyrus fusiforme gauche en réponse à des mots et de celle du gyrus fusiforme droit en réponse à des visages chez des enfants dyslexiques par rapport à des sujets contrôles (Monzalvo et al., 2012). En revanche, des damiers ou des maisons induisaient des activations comparables entre les deux groupes. La seconde étude a montré une absence d'accroissement de l'activité du

cortex occipito-temporal gauche pour des stimuli écrits relativement à des faux caractères chez des adolescents dyslexiques (Kronshabel et al., 2013). En revanche, les sujets dyslexiques présentaient comme les sujets contrôles davantage d'activations occipito-temporales droites pour les faux caractères relativement aux stimuli écrits. Ces deux études mettent donc en évidence que le défaut de mise en place d'un traitement spécialisé au sein du gyrus fusiforme ne se généraliserait pas à l'ensemble des stimuli visuels.

Conjointement à ces déficits du fonctionnement du gyrus fusiforme gauche, des sur-activations ont été rapportées au niveau occipito-temporal droit chez des adultes (Pugh et al., 2001; Shaywitz et al., 1998) et chez des enfants dyslexiques (Shaywitz et al., 2002). Ces résultats ont été interprétés comme le recours à des mécanismes compensatoires chez les sujets dyslexiques. Il est enfin important de remarquer que des corrélations négatives ont été établies chez des enfants normolecteurs et chez des enfants dyslexiques entre les habiletés à traiter des mots et des pseudomots écrits et le degré d'activation du cortex occipito-temporal droit (Shaywitz et al., 2002).

Enfin, comme pour les cas de dyslexies acquises suite à des lésions cérébrales, les altérations du gyrus fusiforme gauche pourraient concerner non seulement le fonctionnement de la structure cérébrale en elle-même mais aussi ses connections avec les aires frontales et pariétales gauches sollicitées lors du traitement des stimuli écrits. Des déficits de connectivité dans l'hémisphère gauche entre le cortex occipito-temporal et des structures sous-tendant le traitement phonologique telles que le gyrus angulaire ont été montrées chez adultes dyslexiques (Horwitz, Rumsey, & Donohue, 1998; Pugh, Mencl, Shaywitz, Shaywitz, Fulbright, Constable, Skudlarski, Marchione, Jenner, Fletcher, Liberman, Shankweiler, Katz, Lacadie, & Gore, 2000). Des altérations de la connectivité entre le cortex occipito-temporal gauche et le gyrus frontal inférieur gauche ont également été rapportées (Shaywitz, Shaywitz, Fulbright, Skudlarski, Mencl, Constable, Pugh, Holahan, Marchione, Fletcher, Lyon, & Gore,

2003; Stanberry, Richards, Berninger, Nandy, Aylward, Maravilla, Stock, & Cordes, 2006). Ces résultats ont été répliqués chez des enfants dyslexiques (Van der Mark, Klaver, Bucher, Maurer, Schulz, Brem, Martin, & Brandeis, 2011). Des travaux réalisés chez des enfants dyslexiques ont en outre montré une réduction des influences modulatrices du gyrus fusiforme gauche sur le cortex pariétal gauche et le gyrus frontal inférieur gauche (Cao, Bitan, & Booth, 2008). Ces travaux montrent qu'en plus des sous-activations du gyrus fusiforme gauche, les sujets dyslexiques présentent aussi des anomalies des interactions entre cette structure et les autres régions cérébrales sollicitées lors du traitement des stimuli écrits. L'ensemble des altérations observées au niveau du gyrus fusiforme gauche sont considérées comme des corrélats neuro-anatomiques associés à la dyslexie. Certains travaux se sont intéressés au corrélat électrophysiologique de l'activité de cette structure chez les lecteurs dyslexiques.

## **2. Défaut d'expertise visuelle pour l'écrit et corrélat électrophysiologique**

Des études d'ERP ont mesuré la spécialisation du composant N170 pour le traitement des stimuli écrits relativement à des stimuli visuels contrôles (i.e., comparaison lettres/symboles) chez des sujets dyslexiques. Chez les normolecteurs, une augmentation de l'amplitude du composant N170 pour des stimuli écrits relativement à des symboles a été observée, et ce dès les premières étapes de l'acquisition de la lecture (i.e., à 8.3 ans; Maurer et al., 2007). Cette spécialisation était en revanche absente chez des enfants dyslexiques du même âge. Ce premier résultat montre que l'apprentissage de la lecture ne s'accompagnerait pas d'une spécialisation du composant N170 chez les lecteurs dyslexiques. Ce n'est que plus tardivement, chez des enfants âgés de 11.5, qu'une spécialisation du composant N170 pour l'écrit a pu être mise en évidence dans la dyslexie (Maurer et al., 2011). Les lecteurs dyslexiques nécessiteraient davantage de pratique de lecture pour présenter le même patron de

résultats que les normolecteurs. La spécialisation du composant N170 pourrait suivre une trajectoire développementale différente chez les lecteurs dyslexiques.

Certains résultats expérimentaux ne concordent pourtant pas avec cette hypothèse de retard de spécialisation du composant N170 dans la dyslexie. Tout d'abord, un défaut de spécialisation du composant N170 pour l'écrit a été rapporté chez des enfants dyslexiques de 10.7 ans dans une tâche de décision visuelle (Araújo, Bramão, Faísca, Petersson, & Reis, 2012). Ce résultat montre qu'un déficit du traitement expert de l'écrit peut persister chez les lecteurs dyslexiques même après quelques années de pratique de lecture. Deuxièmement, des études de MEG ont montré chez des adultes dyslexiques un défaut d'activation du cortex occipito-temporal gauche dans les 150 ms suivant la présentation de mots écrits (Helenius, Tarkiainen, Cornelissen, Hansen, & Salmelin, 1999; Salmelin, Service, Kiesilä, Uutela, & Salonen, 1996). Ces derniers travaux, ajoutés aux résultats d'IRMf présentés précédemment, suggèrent qu'une altération du traitement expert de l'écrit pourrait ne pas se limiter à la période initiale de l'acquisition de la lecture. La question d'un déficit persistant ou d'un retard dans la mise en place d'une reconnaissance experte de l'écrit chez les lecteurs dyslexiques reste donc ouverte. Notre expérience 3 explore justement cet aspect.

En plus de ces déficits de spécialisation du composant N170 pour le traitement des stimuli écrits, des études récentes ont montré des différences d'effet de lexicalité chez des adultes dyslexiques dans des tâches de décision lexicale (Dujardin, Etienne, Contentin, Bernard, Largy, Mellier, Lalonde, & Rebaï, 2011; Shaul, Arzouan, & Goldstein, 2012). Alors que les sujets contrôles présentaient de plus larges amplitudes du composant N170 pour des pseudomots relativement à des mots, les sujets dyslexiques présentaient le patron opposé (Dujardin et al., 2011) ou une absence d'effet (Shaul et al., 2012). Les altérations de spécialisation du composant N170 ne se limiteraient donc pas à un défaut du traitement expert de l'écrit chez les lecteurs dyslexiques.

En résumé, l'ensemble de ces études montre chez les sujets dyslexiques un défaut du traitement expert de l'écrit associé à des altérations du fonctionnement du gyrus fusiforme gauche ainsi que de ses connexions avec les structures impliquées dans les traitements phonologique et sémantique. Le gyrus fusiforme gauche peut être considéré comme la base neuro-anatomique sous-tendant les déficits de lecture des sujets dyslexiques. Les troubles du traitement rapide et en parallèle des stimuli écrits observés chez les lecteurs dyslexiques pourraient être en partie liés à des déficits phonologiques et attentionnels sous-tendus par la voie dorsale. Les sections suivantes décrivent ces processus ainsi que leurs relations possibles avec les altérations observées au niveau du gyrus fusiforme gauche.

## **II. Les traitements phonologique et attentionnel chez les lecteurs dyslexiques**

En dehors d'un défaut du traitement expert de l'écrit, les troubles phonologiques et attentionnels sont les principaux déficits rapportés chez les lecteurs dyslexiques. Les sections suivantes détaillent les altérations de ces processus ainsi que leur impact sur la reconnaissance visuelle des mots dans la dyslexie.

### **1. Les déficits phonologiques des lecteurs dyslexiques**

#### **1.1. Les déficits phonologiques observés**

De nombreux déficits phonologiques ont été observés dans la dyslexie. D'une part, de très faibles performances de conscience phonologique ont été rapportées (Bruck, 1992; Fletcher, Shaywitz, Shankweiler, Katz, Liberman, Stuebing, Francis, Fowler, & Shaywitz, 1994; Stanovich & Siegel, 1994). Les capacités de conscience phonologique sont considérées comme un des meilleurs prédicteurs du niveau de lecture ultérieur (Torgesen et al., 1994). Les performances de conscience phonologique permettent en effet de distinguer les normolecteurs des dyslexiques (Fletcher et al., 1994; Stanovich & Siegel, 1994) et ce même à l'âge adulte (Bruck, 1992; Shaywitz, Fletcher, Holahan, Shneider, Marchione, Stuebing, Francis, Pugh, & Shaywitz, 1999). D'autre part, des déficits en mémoire à court terme verbale et en dénomination rapide ont été rapportés chez les dyslexiques (Snowling, 2000; Vellutino, Scanlon, & Spearing, 1995). Ces deux déficits ainsi que le trouble de conscience phonologique ont dans un premier temps été associés à une dégradation des représentations phonologiques (Goswami, 2000; Snowling, 2000; Ziegler & Goswami, 2005). Il a été suggéré plus récemment que les représentations phonologiques seraient préservées et que le déficit se situerait au niveau de l'accès à ces représentations (Ramus & Szenkovitz, 2008; Wimmer &

Schurz, 2010). Un déficit d'accès aux unités syllabiques à partir des lettres a justement été récemment mis en évidence chez des enfants dyslexiques dans une tâche de conjonctions illusoires (Doignon-Camus, Seigneuric, Perrier, Sisti, & Zagar, 2012).

L'ensemble de ces troubles phonologiques rend compte des difficultés marquées des lecteurs dyslexiques à traiter les stimuli écrits qui nécessitent un assemblage des codes orthographiques et des codes phonologiques. Les sujets dyslexiques présentent en effet des troubles majeurs de traitement des pseudomots (Rack, Snowling, & Olson, 1992; Sprenger-Charolles, Colé, Lacert, & Serniclaes, 2000), particulièrement lorsqu'ils sont longs (Sprenger-Charolles, Colé, Kipffer-Piquard, Pinton, & Billard, 2009). Le décodage sériel serait donc particulièrement altéré chez les lecteurs dyslexiques. Une étude a confronté les déficits comportementaux observés chez des enfants dyslexiques aux différents composants du modèle DRC (Ziegler, Castel, Pech-Georgel, George, Alario, & Perry, 2008). Les résultats ont révélé deux déficits phonologiques. Des performances altérées en dénomination d'images ont tout d'abord indiqué un trouble d'accès au lexique phonologique. Ce premier trouble a été rattaché à la voie lexicale du modèle. Les dyslexiques montraient également des performances altérées dans une tâche de décision de similarité phonologique. Ce trouble a été interprété comme un défaut d'utilisation des informations phonologiques requises pour la conversion lettres-sons et rattaché à la voie sublexicale du modèle. Les troubles phonologiques des lecteurs dyslexiques interviendraient donc au niveau des deux voies d'accès au lexique.

Ces troubles phonologiques observés chez les lecteurs dyslexiques ont été associés à des anomalies anatomiques des régions cérébrales impliquées dans le traitement phonologique chez les lecteurs experts. Ces altérations ont pour la première fois été mises en évidence lors de l'examen post-mortem de cerveaux de sujets dyslexiques (Galaburda & Kemper, 1979; Galaburda, Sherman, Rosen, Aboitiz, & Geschwind, 1985). Ces travaux ont permis

d'identifier des anomalies de migration neuronale (i.e., des ectopies et des microgyries) localisées au niveau des régions périssylviennes gauches.

Des études plus récentes ont montré des altérations fonctionnelles au sein des structures sous-tendant le traitement phonologique chez les lecteurs dyslexiques. Une récente méta-analyse a ainsi identifié des sous-activations marquées des gyri supramarginal et temporal supérieur gauches (Richlan et al., 2009). Ce profil de sous-activations a été rapporté avec constance en imagerie cérébrale chez des adultes dyslexiques dans des tâches de lecture, de décision lexicale ou de jugement de rimes réalisées sur des mots et des pseudomots. Des sous-activations ont en effet été rapportées au niveau du gyrus temporal supérieur gauche (Shaywitz et al., 1998; Blau, van Atteveldt, Ekkebus, Goebel, & Blomert, 2009), ou de structures situées au niveau du cortex pariétal inférieur gauche comme le gyrus supramarginal (Rumsey et al., 1997) et le gyrus angulaire (Rumsey et al., 1997; Shaywitz et al., 1998). Des résultats similaires ont été obtenus chez des enfants dans des tâches de décision de rimes pour des pseudomots (Shaywitz et al., 2002; Simos, Breier, Fletcher, Foorman, Bergman, Fishbeck, & Papanicolaou, 2000). De plus, des études interlangues ont montré que ces sous-activations du gyrus temporal supérieur gauche et de structures du cortex pariétal inférieur gauche (i.e., le gyrus angulaire) ne varient pas selon le système d'écriture (i.e., en anglais et en chinois; Hu et al., 2010).

Des travaux d'ERP ont apporté des précisions concernant les étapes de traitement phonologiques altérées chez les lecteurs dyslexiques. De récentes études ont distingué des étapes de traitement phonologiques précoces et plus tardives dans des tâches de décision de rimes et de décision sémantique phonologique (Savill & Thierry, 2011a; 2011b; 2012). Des adultes dyslexiques montraient une préservation de l'activation des représentations phonologiques, associée aux composants précoces P200 et N200 (Savill & Thierry, 2011a, 2011b; 2012). Les sujets dyslexiques présentaient en revanche une atténuation marquée des

effets de similarité phonologique sur le composant P600 relativement aux lecteurs experts (Savill & Thierry, 2011a). Ce résultat a été associé à un trouble d'intégration et de maintenance des informations phonologiques. Le déficit des dyslexiques ne se situerait donc pas au niveau de l'activation des unités phonologiques mais concernerait leur traitement ultérieur une fois qu'elles ont été activées. A notre connaissance, la plupart des études d'ERP explorant les troubles phonologiques des lecteurs dyslexiques se sont concentrées sur des composants fronto-centraux, bien que des composants postérieurs, générés au niveau du cortex pariétal inférieur gauche, ont aussi été associés au traitement phonologique chez le lecteur expert.

## **1.2. Les mécanismes de compensation observés**

En parallèle à ces sous-activations observées au niveau de l'hémisphère gauche, des sur-activations du cortex pariétal inférieur droit ont été rapportées chez des enfants (Simos et al., 2000) et chez des adultes dyslexiques (Shaywitz et al., 1998). Des études menées en ERP soutiennent également un défaut de latéralisation gauche du traitement phonologique chez les sujets dyslexiques. Une absence de latéralisation gauche du composant N320 a ainsi été rapportée chez des enfants dyslexiques dans une tâche de lecture implicite (Araújo et al., 2012) et chez des adultes dyslexiques dans une tâche d'association des unités orthographiques en unités phonologiques (Hasko, Bruder, Bartling, & Schulte-Körne, 2012). Cette étude a en outre montré, à partir d'analyses de sources, davantage d'activation des aires temporo-pariétales droites, comprenant le gyrus supramarginal, chez les sujets dyslexiques relativement aux sujets contrôles. Ces résultats soutiennent l'idée d'un lien entre l'expertise en lecture et la latéralisation gauche du traitement langagier.

Des sur-activations ont également été rapportées au niveau du gyrus frontal inférieur gauche, une structure impliquée dans le traitement phonologique (Shaywitz et al., 1998). Les

sur-activations observées chez les lecteurs dyslexiques dans les structures de l'hémisphère droit ainsi qu'au niveau frontal ont été interprétées comme des mécanismes de compensation par rapport à leurs déficits phonologiques (Pugh et al., 2010).

### **1.3. L'impact des déficits phonologiques sur l'expertise de l'écrit**

La théorie du mapping phonologique (i.e., 'phonological mapping theory'; Maurer & McCandliss, 2007; McCandliss & Noble, 2003) postule que l'émergence d'une reconnaissance experte de l'écrit au niveau du gyrus fusiforme gauche dépendrait d'un traitement phonologique adéquat au sein des structures dorsales de l'hémisphère gauche au moment de l'apprentissage de la lecture. L'impact de l'acquisition des correspondances lettres-sons durant l'apprentissage de la lecture sur les capacités ultérieures de reconnaissance rapide des stimuli écrits est particulièrement souligné dans les modèles de lecture (Doignon-Camus & Zagar, 2009; in press; Grainger & Ziegler, 2011; Harm & Seidenberg, 2004; Seidenberg & McClelland, 1989; Ziegler & Goswami, 2005). Le défaut du traitement expert de l'écrit observé chez les lecteurs dyslexiques pourrait donc être lié à leurs troubles phonologiques. Des arguments expérimentaux soutiennent cette hypothèse. Des corrélations positives entre les habiletés de décodage et le degré d'activation du cortex temporal inférieur gauche en réponse à des stimuli écrits ont ainsi été rapportées chez des enfants dyslexiques (Shaywitz et al., 2002). Des corrélations entre l'activation du gyrus angulaire, sous-tendant le traitement phonologique, et le niveau de lecture ont aussi été observées chez des adultes dyslexiques (Rumsey, Horwitz, Donohue, Nace, Maisog, & Anderson, 1999). Les études montrant des déficits de connectivité fonctionnelle entre le cortex occipito-temporal gauche et le cortex pariétal inférieur gauche chez les sujets dyslexiques soutiennent également l'idée que les déficits observés au sein de ces deux structures cérébrales ne seraient pas indépendants (Horwitz et al., 1998; Pugh et al., 2000b; Van der Mark et al., 2011). Il a en

autre été montré que les connexions entre ces structures sont corrélées avec les performances phonologiques des participants (Van der Mark et al., 2011). Les déficits phonologiques des lecteurs dyslexiques pourraient donc compromettre l'établissement de connexions adéquates entre les structures de l'hémisphère gauche qui sous-tendent les traitements visuel et phonologique des stimuli écrits. En définitive, la théorie du mapping phonologique présente l'avantage d'associer le déficit phonologique majeur des lecteurs dyslexiques à leur défaut de traitement expert des stimuli écrits. C'est ce qui peut expliquer pourquoi les troubles phonologiques sont placés au centre de la dyslexie. D'autres déficits ont pourtant été décrits chez les lecteurs dyslexiques. Certains de ces troubles semblent indépendants des processus phonologiques, tels que certaines altérations du traitement attentionnel.

## **2. Les déficits attentionnels des lecteurs dyslexiques**

### **2.1. Les déficits du déplacement sériel de l'attention**

Certains troubles attentionnels rapportés chez les lecteurs dyslexiques ont été rattachés à des altérations de processus de haut niveau sous-tendus par la voie magnocellulaire. Cette voie projette vers le cortex pariétal postérieur droit, impliqué dans l'attention visuo-spatiale (Stein & Walsh, 1997; Vidyasagar & Pammer, 2010). Lors de la reconnaissance des stimuli écrits, le cortex pariétal postérieur droit sous-tendrait la sélection des lettres ou des groupes de lettres qui seront ensuite analysées au sein du gyrus fusiforme gauche. Il a été suggéré que le déplacement automatique de l'attention, primordial lors du traitement sériel de l'information, serait ralenti chez les lecteurs dyslexiques ('sluggish attentional shifting', Hari & Renvall, 2001). Un ralentissement du désengagement de l'attention du stimulus en cours de traitement induirait des difficultés du réengagement de l'attention vers les autres stimuli à traiter. Des études ont en effet montré un ralentissement de l'engagement et du désengagement de l'attention dans des tâches de clignement attentionnel chez des enfants dyslexiques

(Dispaldro, Leonard, Corradi, Ruffino, Bronte, Facoetti, 2012; Facoetti, Ruffino, Peru, Paganoni, & Chelazzi, 2008; Ruffino, Trussardi, Gori, Finzi, Giovagnoli, Menghini, Benassi, Molteni, Bolzani, Vicari, & Facoetti, 2010; Visser, Boden, & Giaschi, 2004) et chez des adultes dyslexiques (Hari, Valta, & Uutela, 1999). D'autres travaux ont décrit des déficits d'orientation automatique de l'attention dans des tâches d'indigage chez des enfants dyslexiques (Facoetti, Lorusso, Paganoni, Cattaneo, Galli, & Mascetti, 2003; Facoetti, Paganoni, Turatto, Marzola, & Mascetti 2000; Facoetti, Zorzi, Cestnick, Lorusso, Molteni, Paganoni, Umilta, & Mascetti, 2006) et chez des adultes dyslexiques (Roach & Hogben, 2004). Il a de plus été montré que ce déficit d'orientation automatique de l'attention est amodal (Facoetti, Trussardi, Ruffino, Lorusso, Cattaneo, Galli, Molteni, & Zorzi, 2010). Ces altérations de l'orientation attentionnelle ont été confirmées en ERP. Une réduction de l'amplitude du composant N200 en réponse à des indices spatiaux a ainsi été montrée chez des adultes dyslexiques dans une tâche d'orientation attentionnelle (Dhar, Been, Minderaa, & Althaus, 2008). Une autre étude a décrit chez des enfants dyslexiques une absence de modulation du composant N200 en réponse au mouvement de stimuli visuels présentés dans une tâche de détection visuelle (Jednoróg, Marchewka, Tacikowski, Heim, & Grabowska, 2011). Ces déficits d'orientation attentionnelle pourraient constituer un facteur majeur dans l'émergence des troubles de reconnaissance visuelle des lecteurs dyslexiques, comme suggéré par deux études récentes. Des déficits visuo-attentionnels ont tout d'abord été observés chez des enfants pré-lecteurs ayant une histoire familiale de dyslexie (Kevan & Pammer, 2008). Une étude longitudinale a également montré que les performances dans des tâches d'attention visuelle chez des pré-lecteurs sont prédictives des capacités ultérieures de lecture (Franceschini, Gori, Ruffino, Pedrolli, & Facoetti, 2012).

Le déplacement sériel de l'attention a été associé au cortex pariétal postérieur droit (Stein & Walsh, 1997; Vidyasagar & Pammer, 2010). On peut donc faire l'hypothèse que les lecteurs dyslexiques présentent des anomalies au niveau de cette structure. Un argument en faveur de cette hypothèse provient de la mini-héminégligence gauche caractéristique des lecteurs dyslexiques (Hari & Koivikko, 1999). Ces derniers auraient une distribution asymétrique de l'attention visuo-spatiale. La sélection de l'information visuelle serait biaisée en faveur du champ visuel droit, ce qui induirait une sur-distractibilité droite, avec une difficulté à inhiber les informations situées à droite de la cible à traiter. Ce biais aurait en outre pour conséquence une négligence de l'information située dans le champ visuel gauche. Des déficits d'analyse de stimuli présentés dans le champ visuel gauche ont en effet été rapportés chez des enfants dyslexiques à partir d'une grande variété de paradigmes expérimentaux tels que des tâches de flanker (Facoetti & Turatto, 2000), d'indiçage (Facoetti, Turatto, Lorusso, & Mascetti, 2001), de clignement attentionnel (Ruffino et al., 2010) ou encore de détection de cible (Facoetti, & Molteni, 2001). Cette mini-héminégligence gauche des lecteurs dyslexiques serait sous tendue par des altérations du fonctionnement du cortex pariétal postérieur droit, comme c'est le cas de patients présentant des lésions de cette structure (Posner, Walker, Friedrich, & Rafal, 1984). Les sujets dyslexiques présentent en effet des anomalies au niveau de structures de la voie dorsale dont les afférences projettent vers le cortex pariétal postérieur droit. Des altérations des activations de la voie magnocellulaire (Livingstone, Rosen, Drislane, & Galaburda, 1991) ainsi que des sous-activations de l'aire temporale moyenne (V5) ont ainsi été rapportées chez des adultes dyslexiques (Demb, Boynton, & Heeger, 1997; 1998; Eden, VanMeter, Rumsey, Maisog, Woods, & Zeffiro, 1996). De plus, les sous-activations de l'aire temporale moyenne étaient corrélées aux capacités de lecture (Demb et al., 1997; 1998). L'hypothèse d'un déficit du fonctionnement du cortex pariétal droit est également soutenue par des études d'ERP. Une

première étude a montré une absence de latéralisation droite du composant postérieur P3, associé à l'allocation des ressources attentionnelles, chez des enfants dyslexiques dans une tâche de Go/No-Go (Taroyan, Nicolson, & Fawcett, 2007). Une seconde étude a rapporté une réduction des amplitudes du composant P3 sur des sites postérieurs dans l'hémisphère droit chez des adultes dyslexiques dans une tâche d'orientation attentionnelle (Dhar et al., 2008). Le déficit du déplacement rapide de l'attention observé chez les lecteurs dyslexiques pourrait donc être sous-tendu par des altérations du cortex pariétal postérieur droit.

En plus d'une assymétrie, la distribution des ressources attentionnelles a été rapportée comme étant plus étendue chez des enfants dyslexiques dans des tâches de détection de cibles (Facoetti, Paganoni, & Lorusso, 2000; Geiger, Cattaneo, Galli, Pozzoli, Lorusso, Facoetti, & Molteni, 2008; Lorusso Facoetti, Pesenti, Cattaneo, Molteni, & Geiger, 2004). La difficulté à focaliser son attention pourrait induire une plus grande sensibilité aux informations non pertinentes qui sont adjacentes aux cibles à traiter. Des travaux ont justement montré une difficulté à inhiber l'interférence de distracteurs chez des enfants (Vidyasagar & Pammer, 1999) et des adultes dyslexiques (Bucholz & McKone, 2004; Iles, Walsh, & Richardson, 2000). Ces déficits de focalisation attentionnelle et d'inhibition des distracteurs ont également été mis en évidence à partir d'une tâche de flanker chez des enfants dyslexiques (Bednarek, Saldaña, Quintero-Gallego, Garcia, Grabowska, & Gómez, 2004).

Dans la plupart des études mentionnées, le traitement visuo-attentionnel a été évalué à partir de tâches reposant sur du matériel non langagier. Certains travaux se sont intéressés au traitement attentionnel en rapport avec des stimuli écrits. Une étude récente a montré une réduction de l'amplitude du composant P100 dans une tâche de décision lexicale chez des adultes dyslexiques (Dujardin, et al., 2011). Ce résultat a été interprété comme une limitation des ressources attentionnelles chez les lecteurs dyslexiques. Certains travaux ont mis en

évidence des effets particulièrement marqués de masquage latéral (i.e., la difficulté à identifier une lettre cible lorsqu'elle est présentée avec des lettres adjacentes) chez des adultes dyslexiques (Bouma & Legein, 1977; Callens, Whitney, Tops, & Brysbaert, 2013). De plus, le masquage latéral était corrélé positivement aux performances en lecture de mots. Il est donc possible que les dyslexiques aient des difficultés à identifier les unités sublexicales/lexicales à traiter à cause d'un défaut d'inhibition des lettres adjacentes. Des études ont justement montré qu'augmenter l'espace entre les lettres a un effet bénéfique chez des enfants dyslexiques dans des tâches de décision lexicale et de lecture de texte (Perea, Panadero, Moret-Tatay, & Gomez, 2012; Zorzi, Barbiero, Facoetti, Lonciari, Carrozzi, Montico, Bravar, George, Pech-Georgel, & Ziegler, 2012). D'autres études ont montré des différences lors du traitement de pseudomots, un matériel qui sollicite d'importantes ressources attentionnelles. Une réduction de l'amplitude du composant N100, associé au déplacement de l'attention, a ainsi été rapportée chez des enfants dyslexiques en réponse à des pseudomots (Wimmer, Hutzler, & Wiener, 2002). Des troubles d'orientation de l'attention vers les correspondances entre des unités orthographiques et des unités phonologiques (i.e., composant P3a) ont aussi été mises en évidence chez des adultes dyslexiques (Savill & Thierry, 2011b; 2012). Enfin, une étude récente d'IRMf a montré des sous-activations du cortex pariétal inférieur en réponse à des pseudomots dans une tâche de décision lexicale phonologique (Wimmer, Schurz, Sturm, Richlan, Klackl, Kronbichler, Ladurner, 2010). L'implication de l'attention lors de l'association des unités orthographiques et des unités phonologiques pourrait être déficitaire chez le lecteur dyslexique. Il a été suggéré qu'un ralentissement du déplacement de l'attention pourrait altérer la segmentation attentionnelle des séquences de lettres en groupes de lettres. Ce déficit aurait alors un impact négatif non seulement sur le traitement expert des lettres mais aussi sur le décodage phonologique (Facoetti et al., 2006; Facoetti et al., 2008, Vidyasagar & Pammer, 2010). Des études ont par ailleurs rapporté des corrélations entre les

déficits d'engagement ou de désengagement attentionnel et la conscience phonologique (Lallier, Donnadieu, & Valdois, 2010a) ou encore la lecture de non-mots (Facoetti et al., 2008). De plus, il a été montré que les déficits d'attention visuo-spatiale touchent sélectivement les dyslexiques caractérisés par des troubles phonologiques (Facoetti et al., 2006, 2010; Roach & Hogben, 2007; Ruffino et al., 2010). Certains troubles attentionnels des lecteurs dyslexiques pourraient donc être directement reliés à leurs troubles phonologiques.

## **2.2. Les déficits d'empan visuo-attentionnel**

Les troubles d'attention sérielle ne seraient pas les seuls déficits attentionnels des lecteurs dyslexiques. Valdois et collaborateurs ont en effet mis en évidence des altérations de l'identification en parallèle chez des enfants dyslexiques dans une tâche de report de lettres (Lassus-Sangosse, N'guyen-Morel, & Valdois, 2008). Le modèle MTM (Ans et al., 1998) attribue un rôle majeur à la fenêtre visuo-attentionnelle, qui détermine la quantité d'unités orthographiques distinctes pouvant être traitées simultanément, pour le traitement des stimuli écrits. Une limitation des ressources attentionnelles mobilisables pour analyser simultanément les lettres qui composent les mots pourrait en effet compromettre l'identification globale des mots. Une réduction de la fenêtre visuo-attentionnelle pourrait également altérer le décodage sériel des stimuli écrits, puisque ce processus implique de traiter des lettres isolées mais aussi des groupes de lettres (e.g., de syllabes). Une étude a récemment mis en évidence un déficit d'attention visuo-spatiale touchant les deux voies d'accès au lexique chez des enfants dyslexiques (Ziegler et al., 2008). Les sujets dyslexiques présentaient un taux d'erreur plus élevé que les sujets contrôles dans une tâche de recherche de lettres, consistant à indiquer si une lettre cible est présente ou non dans une séquence de lettres. Le déficit était observé lorsque la séquence de lettre était non familière mais aussi lorsqu'elle correspondait à un mot familier. Ces résultats ont été interprétés comme le signe d'un déficit d'analyse en parallèle

des lettres touchant les deux procédures de traitement des stimuli écrits. Le substrat neuro-anatomique du déficit d'empan visuo-attentionnel a été mis en évidence chez des enfants dyslexiques et concernerait des régions pariétales (i.e., le lobule pariétal supérieur et le lobule pariétal inférieur gauche; Peyrin et al., 2010).

Certains travaux ont tenté de préciser l'origine visuelle ou langagière des troubles d'empan visuo-attentionnel des lecteurs dyslexiques. Une première étude a exploré le traitement simultané de séquences de stimuli chez des enfants dyslexiques dans une tâche d'identification visuelle (Ziegler, Pech-Georgel, Dufau, & Grainger, 2010). Les résultats ont montré un taux de réponses correctes réduit chez les sujets dyslexiques relativement aux sujets contrôles pour les stimuli impliquant un décodage phonologique (i.e., des lettres et des chiffres). Les performances des sujets dyslexiques étaient en revanche préservées pour des stimuli visuels n'impliquant pas de décodage phonologique (i.e., des séquences de symboles non familiers pour l'enfant). Les déficits de traitement de séquences de stimuli visuels ont donc été rattachés à un déficit phonologique. De récentes études vont cependant à l'encontre de cette conclusion. Valdois, Lassus-Sangosse et Lobier (2012) ont ainsi suggéré qu'en plus de se distinguer sur une base phonologique, des séquences de lettres et de chiffres présentent davantage de familiarité visuelle que des séquences de symboles. Adoptant le même paradigme que Ziegler et collaborateurs (2010), Valdois et collaborateurs (2012) ont comparé les performances d'enfants dyslexiques pour des lettres et des chiffres relativement à des pastilles de couleurs. Ces stimuli ont l'avantage d'avoir des noms tout aussi familiers que ceux des lettres ou des chiffres. Il est en revanche moins habituel d'être amené à traiter des séquences de pastilles de couleurs, qui sont donc moins familières visuellement, que des séquences de lettres et de chiffres. Ce design expérimental a donc permis d'évaluer l'origine phonologique ou visuelle du trouble de traitement de séquences de stimuli chez les lecteurs dyslexiques. Ces derniers présentaient un déficit limité au traitement des lettres et des chiffres

alors que le traitement des pastilles de couleur ne différait pas du groupe contrôle. Comme les trois types de stimuli ne différaient pas dans leur familiarité verbale, ce résultat permet d'écarter une origine phonologique et entre en faveur d'une origine visuelle des troubles d'empan visuo-attentionnels des lecteurs dyslexiques. De plus, une récente étude a montré que les déficits d'empan visuo-attentionnel rapportés chez les sujets dyslexiques pouvaient s'observer pour du matériel langagier et non langagier dans une tâche de catégorisation n'impliquant pas de traitement phonologique (Lobier, Zoubinetzky, & Valdois, 2012).

La dissociation entre les troubles d'empan visuo-attentionnel et les déficits phonologiques des lecteurs dyslexiques est également soutenue par des études de cas. Alors qu'un adolescent dyslexique présentait un trouble sélectif d'empan visuo-attentionnel en l'absence de déficits phonologiques, le patron inverse a pu être observé chez un autre sujet dyslexique (Valdois, Bosse, Ans, Carbonnel, Zorman, David, & Pellat, 2003). Cette double dissociation a été récemment confirmée en imagerie cérébrale chez des jeunes adultes (Peyrin, Lallier, Démonet, Pernet, Baciù, Le Bas, & Valdois, 2012). Ainsi, un dyslexique caractérisé par un trouble d'empan visuo-attentionnel présentait des sous-activations du lobe pariétal supérieur bilatéral et du gyrus supramarginal gauche dans une tâche d'empan alors que ses performances et ses activations cérébrales étaient comparables à un groupe contrôle dans une tâche de décision de rime. A l'inverse, un sujet dyslexique caractérisé par des déficits phonologiques présentait des sous-activations des gyri frontal inférieur et supramarginal gauches dans une tâche de décision de rime alors que ses performances et ses activations cérébrales n'étaient pas altérées dans une tâche d'empan. Il a par ailleurs été montré que le trouble d'empan visuo-attentionnel touche une forte proportion d'enfants dyslexiques et que ce trouble est dissocié du trouble phonologique (Bosse et al., 2007). Contrairement aux déficits de déplacement sériel de l'attention observés chez des dyslexiques présentant des troubles phonologiques, le déficit d'empan visuo-attentionnel s'observe en l'absence de ces

derniers. Le déficit de traitement simultané s'observe en outre en l'absence d'altérations du traitement sériel (Lassus-Sangosse et al., 2008). De la même manière, des déficits du traitement attentionnel séquentiel ont pu être décrits chez un dyslexique adulte caractérisé par un trouble phonologique en l'absence de trouble du traitement attentionnel simultané (Lallier, Donnadiou, Berger, & Valdois, 2010b). Ces résultats soulignent l'hétérogénéité de la dyslexie, qui peut être associée à des profils de troubles cognitifs et d'altérations cérébrales distincts. Pour certains sujets dyslexiques, les déficits concerneraient le traitement séquentiel des lettres ainsi que l'accès aux représentations phonologiques alors que pour d'autres sujets dyslexiques, les déficits se situeraient au niveau du traitement simultané des lettres.

En définitive, l'altération de la spécialisation du gyrus fusiforme gauche pour le traitement de l'écrit, observée chez les lecteurs dyslexiques, a été associée à des déficits de processus cognitifs variés sous-tendus par des structures de la voie dorsale. L'étude approfondie des étapes de traitement sous-tendues par les voies ventrale et dorsale est donc d'un intérêt majeur pour la compréhension de la dyslexie.

### **Partie 3. Objectifs**

La reconnaissance visuelle des mots repose sur la coopération des voies ventrale et dorsale. Des altérations au niveau de ces deux voies ont été rapportées chez les lecteurs dyslexiques. Des déficits du traitement expert de l'écrit au niveau de la voie ventrale ont été décrits. Des déficits phonologiques et attentionnels, associés à la voie dorsale, ont également été rapportés. L'ensemble de ces altérations pourraient avoir une base commune puisqu'il a été suggéré que la spécialisation de la voie ventrale pour le traitement expert de l'écrit serait fortement influencée par l'acquisition des correspondances lettres-sons et par la segmentation attentionnelle des séquences de lettres.

Dans l'ensemble, la plupart des études ont pourtant exploré séparément les altérations des voies ventrale et dorsale dans la dyslexie. L'objectif de ce projet de recherche a donc été d'étudier conjointement les implications des voies ventrale et dorsale lors de la reconnaissance visuelle des mots chez des adultes dyslexiques. Des mesures comportementales et d'ERP, une technique présentant une forte résolution temporelle, ont été utilisées. Ce projet de recherche se divise en trois parties. La première partie (i.e., les études 1 et 2) a exploré l'implication des voies ventrale et dorsale lors du traitement en parallèle et lors du traitement sériel de séquences de lettres. La seconde partie (i.e., l'étude 3) a évalué plus particulièrement l'expertise pour le traitement de l'écrit. Enfin, la dernière partie de ce projet de recherche s'est concentrée sur l'étude de l'attention visuo-spatiale dans le traitement de stimuli visuels langagiers (étude 4) et non langagiers (étude 5).

## **Chapitre 2. Méthode**

### **Partie 1. Les critères de sélection des sujets**

Les participants recrutés pour ces études étaient tous des adultes ayant pour langue maternelle le français et présentant une acuité visuelle normale. Des sujets dyslexiques ont été comparés à des sujets contrôles appariés sur l'âge (i.e., des lecteurs experts) dans l'ensemble des études. Un groupe de sujets contrôles appariés sur le niveau de lecture (i.e., des mauvais lecteurs) a été ajouté dans les études 2, 3 et 5. Pour les quatre études d'ERP (i.e., les études 1, 2, 3 et 5), les groupes de sujets étaient appariés sur le sexe, le niveau d'études, ainsi que l'intelligence non verbale. Avant de participer aux études, toutes approuvées par le comité d'éthique local (i.e., le CPP Est II de Besançon), les sujets ont signé un consentement écrit. Tous les sujets dyslexiques ayant participé à nos études ont été diagnostiqués durant l'enfance par un orthophoniste et ont suivi plusieurs années de remédiation de lecture avec un orthophoniste. Aucun sujet ne suivait de remédiation de lecture au moment de la passation de l'étude. Conformément aux critères d'exclusion habituels, aucun des sujets dyslexiques ne présentait d'autre trouble des apprentissages (e.g., dysphasie ou dysorthographe) ni de trouble d'attention avec hyperactivité. Les adultes mauvais lecteurs ne présentaient pas d'histoire personnelle ou familiale de dyslexie ou un autre trouble des apprentissages et n'avaient pas suivi de remédiation de lecture.

Pour l'ensemble des études, les capacités de lecture ont été évaluées avant la session expérimentale. Pour les études d'ERP (i.e., les expériences 1, 2, 3 et 5), nous avons également évalué les performances de dénomination et d'intelligence non verbale. Enfin, les habitudes de lecture ont été déterminées par questionnaire dans les études comprenant un groupe de sujets mauvais lecteurs (i.e., les études 2, 3 et 5). Les capacités de lecture orale ont été

mesurées à partir du test de lecture l'«Alouette» (Lefavrais, 1965). Ce test de lecture fournit un âge de lecture basé sur le temps de lecture et les erreurs. Comme ce test a uniquement été standardisé chez des enfants, les données brutes concernant les temps de lecture et le nombre d'erreurs ont également été analysées. Les capacités de dénomination ont été évaluées à partir de tâches de dénomination d'images et de chiffres adaptées de la «Phonological Assessment Battery» (Frederickson, Frith, & Reason, 1997) ainsi que d'une tâche de dénomination de couleurs (Soroli, Szenkovits, & Ramus, 2010). La somme des temps de dénomination pour chaque catégorie a été mesurée. Enfin, le niveau d'intelligence non verbale a été déterminé à partir des matrices progressives de Raven (Raven, Raven, & Court, 1998). Ce test a été passé en temps limité (i.e., 20 minutes).

## **Partie 2. L'enregistrement et l'analyse des ERP**

### **I. Enregistrements électrophysiologiques et potentiels évoqués**

A l'exception de l'étude 4 qui ne repose que sur des mesures comportementales, les autres expériences de ce projet de recherche combinent des mesures comportementales et ERP. La technique d'électroencéphalographie (EEG) consiste à enregistrer de façon continue l'activité électrique cérébrale au moyen d'électrodes posées sur le scalp. Le tracé obtenu, l'électroencéphalogramme, traduit l'évolution au fil du temps de la différence de potentiel entre une électrode définie comme référence qui a un potentiel stable (e.g., posée sur le lobe de l'oreille) et une électrode posée à la surface du scalp dont le potentiel électrique varie. L'activité EEG résulte de la somme de courants synaptiques générés dans le milieu extracellulaire par un très grand nombre de neurones corticaux et correspondant à l'activité simultanée de plusieurs millions de synapses.

La technique des ERP est utilisée pour visualiser la réponse du système nerveux à une stimulation particulière. Un potentiel évoqué cognitif reflète une modification transitoire de l'activité électrique cérébrale consécutive à la présentation d'un stimulus sensoriel. La variation de potentiel en réponse à un stimulus est de très faible amplitude par rapport au reste du signal EEG. La technique de moyennage (Dawson, 1954) permet alors d'extraire cette réponse de l'EEG global. Les enregistrements EEG recueillis au cours d'une série d'essais sont moyennés après avoir été alignés par rapport à un événement externe tel que l'apparition d'un stimulus à l'écran ou la réponse du sujet. Cet alignement atténue les variations de l'activité électrique cérébrale qui est sans rapport avec l'évènement considéré. Le moyennage va permettre de s'affranchir de cette activité EEG aléatoire alors que l'activité évoquée par l'évènement va s'additionner et pouvoir être visualisée. Cette réponse reflète l'activité nerveuse spécifiquement liée à un événement sensoriel, moteur ou cognitif et est appelée

‘potentiel évoqué par l’évènement’. Les réponses évoquées sont constituées de déflexions positives et négatives, les composants ERP, qui correspondent aux différentes étapes de traitement du stimulus.

Dans nos études, l’EEG a été enregistré à partir de 32 électrodes disposées sur le scalp selon le système 10-20 (Figure 5). Ce système de référence divise le scalp en aires représentant 10 à 20% de la surface totale du crâne. En plus des 32 électrodes disposées sur le scalp, 4 électrodes situées au niveau des yeux ont permis d’obtenir un électro-oculogramme, afin d’identifier les mouvements oculaires horizontaux et verticaux des participants. L’enregistrement du signal a été effectué avec un taux d’échantillonnage (i.e., le nombre d’échantillons pris par seconde) de 2048 Hz. Un filtre passe haut de 0.01 Hz et un filtre passe bas de 500 Hz ont été appliqués pendant l’enregistrement. Des marqueurs (i.e., des triggers) spécifiques à chaque catégorie de stimulus et à chaque type de réponse (i.e., bonne réponse ou mauvaise réponse) ont permis de marquer sur le tracé EEG les moments précis d’apparition des différents stimuli et réponses (i.e., bonne ou mauvaise réponse).

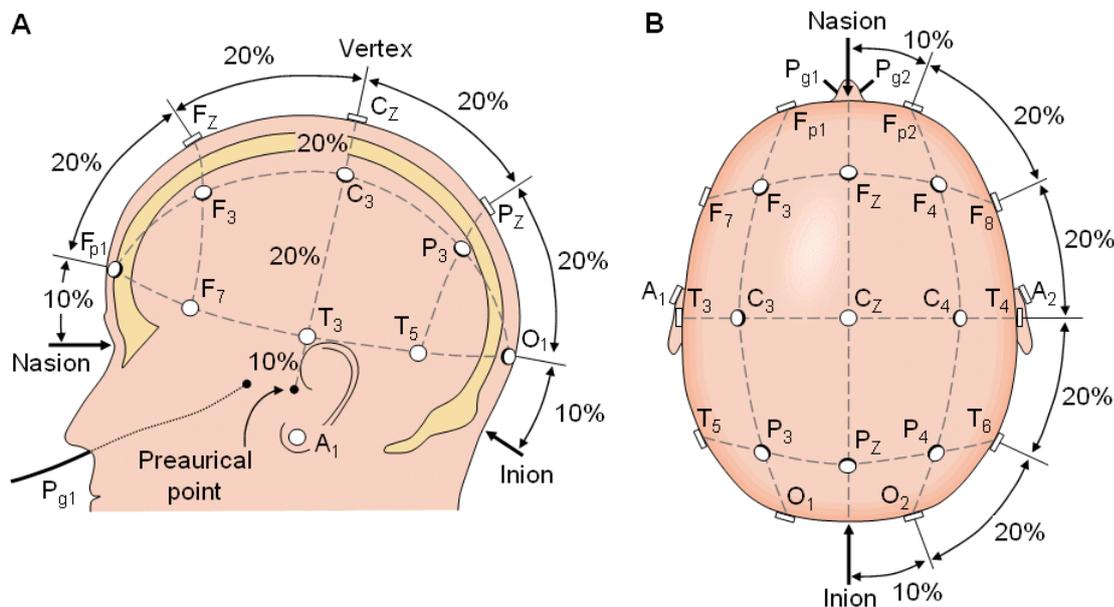


Figure 5. La disposition des électrodes selon le système 10/20 de Jasper (issu de: <http://www-psych.nmsu.edu/~jkroger/lab/principles.html>).

## **II. Analyses off-line des ERP**

### **1. Etudes 1, 2 et 3**

Le logiciel BrainVision Analyzer 1 a été utilisé pour traiter les signaux EEG. L'activité EEG a été re-référencée à la moyenne des électrodes. Le signal produit par le courant alternatif (50 Hz) a été filtré. Aucun autre filtre n'a été utilisé. Les segments artefactés (e.g., mouvements oculaires et mouvements du sujet) ont été supprimés. Ils ont tous été repérés sur la base de critères d'amplitude (i.e., suppression des signaux excédant 100  $\mu$ V). Une segmentation basée sur les triggers a été réalisée sur un intervalle allant de 200 msec avant à 800 msec après la présentation du stimulus, et corrigée à une ligne de base de 200 msec pré-réponse. Seuls les essais correspondant à de bonnes réponses ont été pris en compte dans le moyennage. De plus, pour chaque individu, les essais pour lesquels les temps de réaction excédaient  $\pm 2$  écarts types relativement à leur temps de réaction moyen, ont été exclus des analyses.

Des grandes moyennes ont enfin été calculées pour chaque condition expérimentale dans chacun des groupes de sujets. Les intervalles d'analyse des composants ERP ont été déterminés à partir de l'analyse 'root mean square' (RMS), qui permet de représenter en voltage positif les composants ERP au niveau des 32 électrodes. Dans les études 1, 2 et 3, les composants ERP d'intérêt ont été mesurés au niveau de sites associés par analyse de source à l'activité du cortex occipito-temporal (i.e., P7-P8). Dans les études 1 et 2, les analyses ont également compris des sites associés à l'activité du cortex occipito-pariétal (Rosazza et al., 2009).

## **2. Etude 5**

En dehors de trois aspects, les analyses off-line réalisées pour l'étude 5 sont strictement identiques à celles des autres études. Pour l'expérience 5, l'activité EEG a été re-référencée à la moyenne des deux oreilles. De plus, comme le paradigme de cette expérience impliquait davantage de mouvements oculaires indésirables, une correction oculaire a été appliquée, de façon à estimer l'influence des mouvements oculaires sur les tracés et de la supprimer (Gratton, Coles, & Donchin, 1983). Enfin, comme les composants ERP différaient entre les sites d'intérêts (i.e., le site antérieur Fz et le site postérieur Pz), les fenêtres d'analyse ont été déterminées à partir des grandes moyennes et non pas à partir des RMS.

## **Chapitre 3. Partie expérimentale**

### **Partie 1. Les voies ventrale et dorsale dans le traitement des mots écrits**

La première partie de ce travail de recherche répond à l'objectif global du projet de mesurer l'implication des voies ventrale et dorsale dans la reconnaissance visuelle des mots chez des adultes dyslexiques. Des altérations ont été rapportées au niveau des deux voies chez les lecteurs dyslexiques dans des contextes différents. L'intérêt de nos deux premières expériences a été d'étudier les traitements sous-tendus par les deux voies dans une même tâche d'accès au lexique au moyen d'enregistrements ERP. Une récente étude d'ERP a évalué ces aspects chez des normolecteurs dans une tâche de décision lexicale (Rosazza et al., 2009). Les mécanismes de traitements de séquences de lettres ont été analysés au niveau des deux voies dans une situation de traitement en parallèle, avec des stimuli présentés dans un format visuel familier (i.e., horizontalement), relativement à une situation de traitement sériel, avec des stimuli présentés dans un format visuel inhabituel (i.e., verticalement). Les résultats de cette étude ont mis en évidence une sollicitation des deux voies durant le traitement des stimuli écrits qui différait en fonction du format. Les stimuli présentés horizontalement impliquaient essentiellement la voie ventrale tandis que les stimuli présentés verticalement sollicitaient dans un premier temps la voie dorsale et plus tardivement la voie ventrale. Les deux premières études de ce projet sont dans la continuité de l'étude de Rosazza et collaborateurs (2009) avec des adultes dyslexiques.

## **I. Etude 1. Appariement sur l'âge chronologique: lecteurs dyslexiques vs. lecteurs experts**

Cette étude a eu pour objectif de mesurer les traitements sous-tendus par les voies ventrale et dorsale lors de la reconnaissance visuelle des mots chez des adultes dyslexiques en adoptant un design d'appariement sur l'âge chronologique.

### **1. Méthode**

#### Participants

30 adultes français droitiers ont participé à l'étude: 16 dyslexiques (9 femmes et 7 hommes, moyenne d'âge de 26.4 ans,  $\pm$  6.5 ans) et 14 contrôles (7 femmes et 7 hommes, moyenne d'âge de 25.6 ans,  $\pm$  4.5 ans). Les sujets dyslexiques ont tous été diagnostiqués par un orthophoniste et ne présentaient pas d'autre trouble des apprentissages ni de déficit d'attention avec hyperactivité. Les sujets dyslexiques ont tous bénéficié d'une remédiation de lecture d'au moins 5 ans chez un orthophoniste et ne suivaient pas de remédiation au moment de la passation de l'étude. Comme détaillé dans le Tableau 1, les deux groupes sont appariés sur l'âge chronologique, la durée des études supérieures, ainsi que l'intelligence non verbale. Les performances des sujets dyslexiques sont en revanche altérées par rapport aux sujets contrôles dans le test de lecture. Les altérations concernent non seulement les performances brutes (i.e., les latences de lecture ainsi que le nombre d'erreurs), mais aussi l'âge de lecture normé, pour lequel les sujets dyslexiques présentent en moyenne 36 mois de retard par rapport au groupe contrôle. Les sujets dyslexiques présentent également des latences de dénomination ralenties par rapport au groupe contrôle, quel que soit le matériel considéré.

Tableau 1. Caractéristiques des participants

	Contrôles (n = 14)	Dyslexiques (n = 16)	t (28)
Sexe (homme: femme)	7 : 7	7 : 9	
Age (années)	25.6 ( $\pm$ 4.5)	26.4 ( $\pm$ 6.5)	-0.36 <i>ns</i>
Durée moyenne des études supérieures (années)	1.7 ( $\pm$ 2.1)	1.3 ( $\pm$ 1.9)	0.65 <i>ns</i>
Matrices de Raven (rang centile)	87.9 ( $\pm$ 9.9)	85 ( $\pm$ 10.3)	0.77 <i>ns</i>
Test de lecture de l'Alouette			
Age moyen de lecture normé (mois)	169.3 ( $\pm$ 4.4)	133.3 ( $\pm$ 14.6)	8.86***
Temps de lecture moyen (minutes)	1.6 ( $\pm$ 1)	2.3 ( $\pm$ 4)	-6.38***
Nombre d'erreurs moyen	2.4 ( $\pm$ 1.9)	7.3 ( $\pm$ 3.9)	-4.28***
Test de dénomination (secondes)			
Images	62.3 ( $\pm$ 9.8)	72.1 ( $\pm$ 14.7)	-2.10*
Chiffres	36.8 ( $\pm$ 7.8)	44.9 ( $\pm$ 12.2)	-2.14*
Couleurs	55.9 ( $\pm$ 8.4)	66.1 ( $\pm$ 16.4)	-2.1*
Durée moyenne de la remédiation (années)			
Age moyen de début (années)		8.1 ( $\pm$ 2.6)	
Age moyen de fin (années)		13.1 ( $\pm$ 1.6)	

Note: Différence inter-groupes (test t): *ns*, non significatif, \*  $p \leq .05$ , \*\*\*  $p \leq .001$ .

### Stimuli

70 mots monosyllabiques de 5 lettres ont été sélectionnés dans la base de données française *Lexique 3* (New, Pallier, Ferrand, & Matos, 2001). L'ensemble des stimuli était de

fréquence lexicale élevée (moyenne 244.2 occurrences par million, allant de 74.9 à 732.4). 70 pseudomots prononçables et suivant les règles de l'orthographe française ont ensuite été créés en changeant deux lettres des mots sélectionnés (e.g., heure/houde, porte/poige).

### Procédure

Les participants ont réalisé une tâche de décision lexicale. Au début de chaque essai, les sujets avaient pour instruction de fixer une croix blanche présentée au milieu d'un écran noir pendant 400 ms. La croix de fixation était ensuite remplacée par un écran noir pendant 120 ms, suivie du stimulus présenté pendant 500 ms. Les stimuli, représentant  $2.86^\circ$  d'angle visuel, apparaissaient en lettres minuscules dans la police 'Courier New' (taille 28). Chaque stimulus était présenté deux fois: une fois horizontalement et une fois verticalement, dans un ordre aléatoire (Figure 6). Les participants avaient pour consigne d'indiquer si le stimulus affiché à l'écran correspondait ou non à un mot réel, au moyen de deux touches du clavier. Les sujets devaient appuyer sur la touche 'Ctrl' située à droite de la barre espace avec leur main dominante (i.e., la main droite) si le stimulus présenté correspondait à un mot réel. À l'inverse, les sujets devaient appuyer sur la touche 'Ctrl' située à gauche de la barre espace avec leur main non dominante (i.e., la main gauche) si le stimulus était un pseudomot. Les participants avaient pour consigne de répondre le plus rapidement et le plus précisément possible sans tenir compte du format visuel de présentation des stimuli. Les réponses des participants étaient suivies d'un intervalle inter-essais de 1400 ms. Une session d'entraînement de 10 items était réalisée avant la tâche, qui comprenait 280 essais divisés en 3 blocs expérimentaux.



Figure 6. Représentation schématique des deux formats de présentation des stimuli.

### Analyses ERP

Les essais correspondant à de mauvaises réponses ou des réponses dépassant deux écarts-types des temps de réactions (TRs) moyens de chaque participant ont été exclus des analyses comportementales et électrophysiologiques, induisant la réjection de 4.7% des données pour les sujets contrôles et de 4.6% des données pour les sujets dyslexiques. Les grandes moyennes ont été calculées pour chaque condition au sein de chaque groupe à partir d'une moyenne de 54 essais pour les sujets contrôles (58 essais pour le format horizontal et 50 essais pour le format vertical) et de 51 essais pour les sujets dyslexiques (52 essais pour le format horizontal et 50 essais pour le format vertical). L'analyse des composants ERP a été réalisée au niveau de sites occipito-temporaux pour la voie ventrale (i.e., P7-P8) et de sites occipito-pariétaux pour la voie dorsale (i.e., P3-P4), comme dans l'étude de Rosazza et al. (2009). Les fenêtres temporelles pour les analyses ERP ont été déterminées à partir de la RMS des 32 électrodes. Pour le format horizontal (Figure 7), l'amplitude moyenne du composant N200 a été mesurée entre 140 et 260 ms. Pour le format vertical, la RMS révèle deux patrons distincts entre nos groupes de sujets (Figure 8). Chez les sujets contrôles, la RMS met en évidence deux composants: les composants N100 et N200, avec un maximum d'amplitude enregistré entre 130-210 ms et 210-280 ms respectivement. Chez les sujets dyslexiques, ces

deux composants semblent en revanche fusionnés en un large composant (130-280 ms). Les deux fenêtres temporelles associées aux deux composants ERP observés chez les sujets contrôles ont été sélectionnées pour les analyses statistiques. Enfin, des analyses de pics ont été réalisées à partir d'un programme automatique pour mesurer les latences de chaque composant.

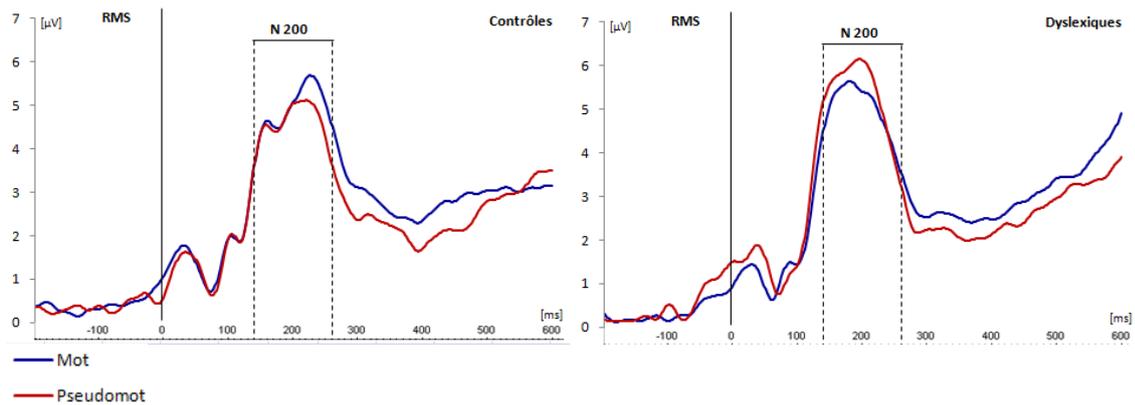


Figure 7. RMS pour chaque condition dans le format horizontal.

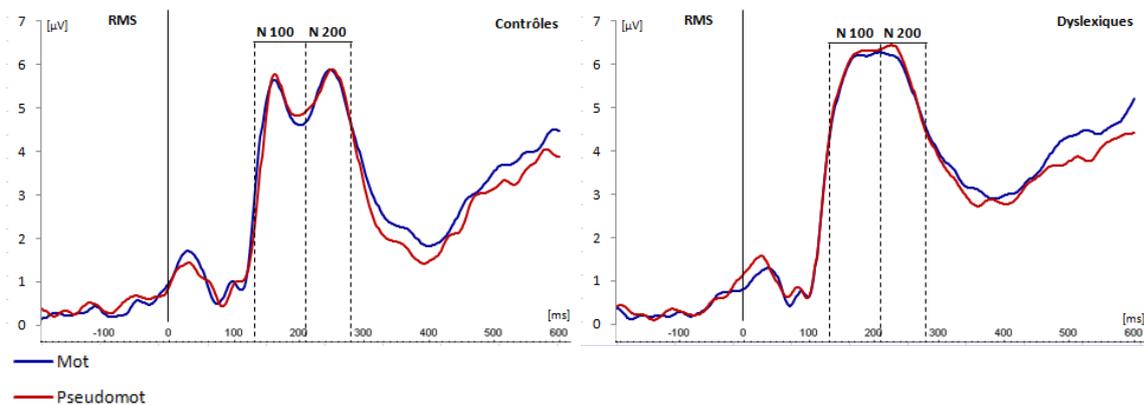


Figure 8. RMS pour chaque condition dans le format vertical.

## 2. Résultats

Des analyses de variance (ANOVA) ont été réalisées à partir du logiciel Statistica 10. Comme les composants ERP diffèrent selon le format, des analyses séparées ont été réalisées pour chaque format de présentation. Ceci nous a permis de déterminer les différences existant

entre les deux groupes dans une situation de traitement en parallèle et dans une situation de traitement sériel.

### Résultats comportementaux

Comme c'est illustré sur les Figures 9 et 10, les TRs et les pourcentages d'erreurs sont plus élevés pour le format vertical que pour le format horizontal. Une ANOVA a été réalisée pour chaque format sur les TRs et le pourcentage d'erreurs. Les analyses comprenaient un facteur intergroupe (i.e., Groupe: contrôles vs. dyslexiques) ainsi qu'un facteur intragroupe (i.e., Lexicalité: mots vs. pseudomots).

#### Format horizontal (Figure 9)

L'analyse des TRs dans le format horizontal révèle un effet significatif du Groupe, avec des TRs plus longs pour les dyslexiques (805 ms) que pour les contrôles (666 ms;  $F(1,28)=7.3$ ,  $p<.05$ ). L'effet de Lexicalité ( $F(1,28)=212.8$ ,  $p<.001$ ) et l'interaction Groupe x Lexicalité sont aussi significatifs ( $F(1,28)=9.6$ ,  $p<.01$ ). Les TRs sont plus élevés pour les pseudomots que pour les mots, et ce de façon plus marquée chez les dyslexiques (673 ms pour les mots, 936 ms pour les pseudomots) que chez les contrôles (580 ms pour les mots, 751 ms pour les pseudomots).

L'analyse du pourcentage d'erreurs montre un effet significatif du Groupe, avec davantage d'erreurs chez les dyslexiques (13.2%) que chez les contrôles (5.6%;  $F(1,28)=7.9$ ,  $p<.01$ ). L'effet de Lexicalité ( $F(1,28)=35.9$ ,  $p<.001$ ) et l'interaction Groupe x Lexicalité sont aussi significatifs ( $F(1,28)=7.6$ ,  $p<.05$ ). Les pseudomots induisent davantage d'erreurs que les mots, et ce de façon plus marquée chez les dyslexiques (4% pour les mots et 22.4% pour les pseudomots) que chez les contrôles (2.2% pour les mots, 9% pour les pseudomots).

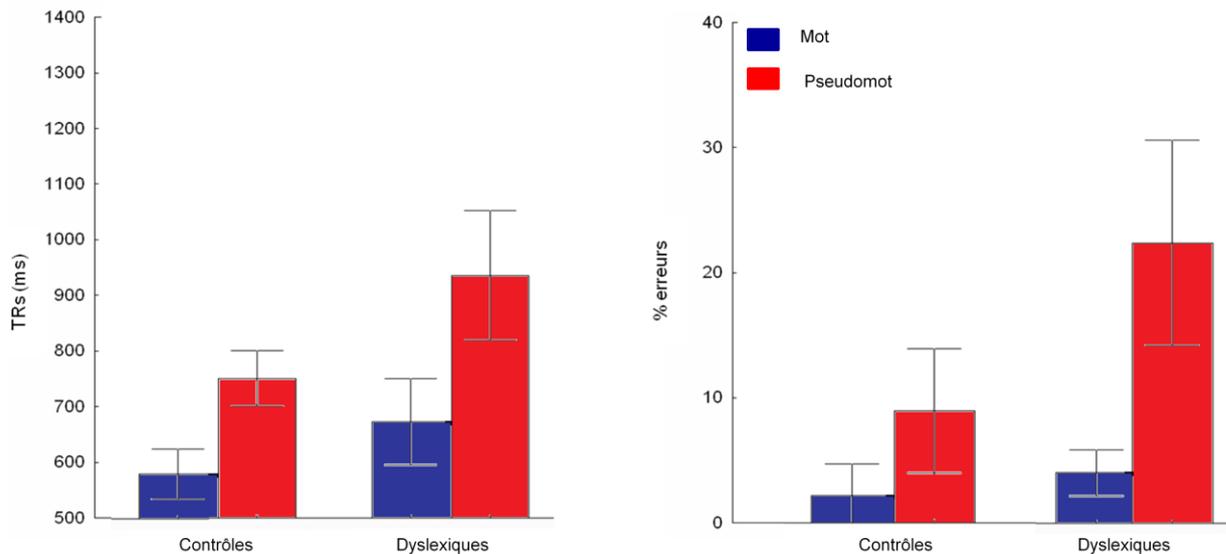


Figure 9. Temps de réaction moyens (TRs) et pourcentage d'erreurs (% erreurs) en fonction du groupe et du type de stimulus pour le format horizontal.

#### Format vertical (Figure 10)

L'analyse des TRs dans le format vertical met en évidence un effet significatif du Groupe, avec des TRs plus longs pour les dyslexiques (1012 ms) que pour les contrôles (854 ms;  $F(1,28)=4.8$ ,  $p<.05$ ). L'effet de Lexicalité ( $F(1,28)=109.4$ ,  $p<.001$ ) et l'interaction Groupe x Lexicalité sont aussi significatifs ( $F(1,28)=5.6$ ,  $p<.05$ ). Les TRs sont plus élevés pour les pseudomots que pour les mots, et ce de façon plus marquée chez les dyslexiques (871 ms pour les mots, 1152 ms pour les pseudomots) que chez les contrôles (757 ms pour les mots, 950 ms pour les pseudomots).

L'analyse du pourcentage d'erreurs montre un effet significatif du Groupe, avec un taux d'erreurs plus élevé chez les dyslexiques (17.8%) que chez les contrôles (8.3%;  $F(1,28)=7.6$ ,  $p<.05$ ). L'effet de Lexicalité est significatif ( $F(1,28)=23$ ,  $p<.001$ ) mais pas l'interaction Groupe x Lexicalité ( $F(1,28)=2$ ,  $p>.10$ ). Le taux d'erreur est plus élevé pour les pseudomots que pour les mots dans les deux groupes de sujets (dyslexiques: 9.8% pour les

mots, 25.8% pour les pseudomots; contrôles: 3.9% pour les mots, 12.7% pour les pseudomots).

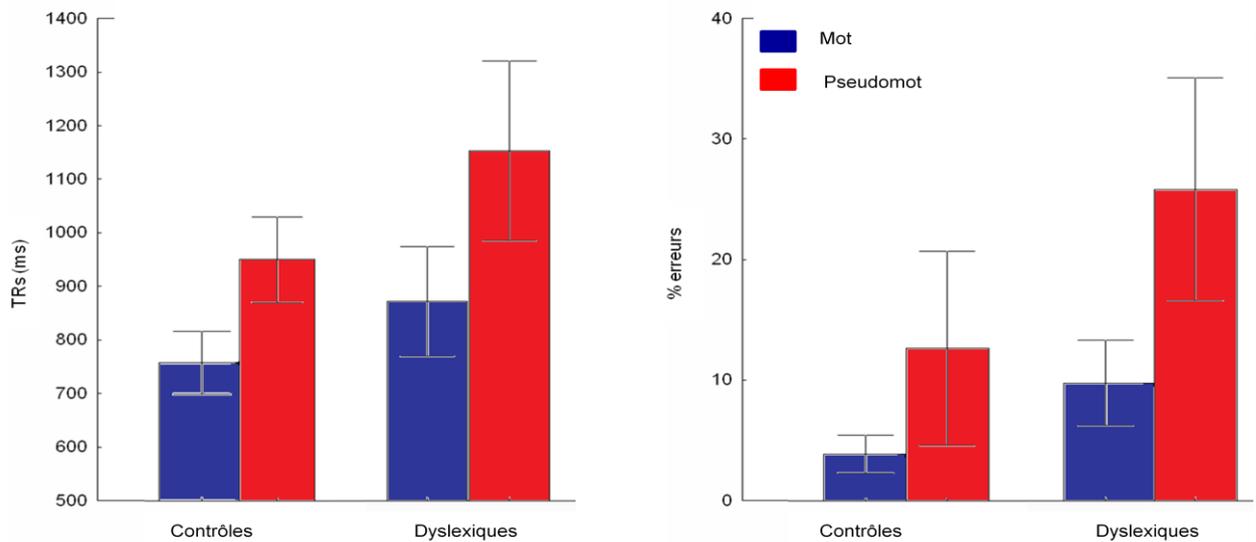


Figure 10. Temps de réaction moyens (TRs) et pourcentage d'erreurs (% erreurs) en fonction du groupe et du type de stimulus pour le format vertical.

### Résultats électrophysiologiques

Les amplitudes moyennes des composants ERPs ont été analysées à partir de quatre ANOVA à mesures répétées: une ANOVA pour chaque format visuel de présentation (i.e., horizontal, vertical) et chaque région cérébrale (i.e., ventrale, dorsale). Les analyses comprenaient un facteur intergroupe (i.e., Groupe: contrôles vs. dyslexiques) et deux facteurs intragroupe (i.e., Lexicalité: mots vs. pseudomots; Hémisphère: gauche vs. droite).

#### Format horizontal

L'analyse réalisée au niveau des sites occipito-temporaux (i.e., P7-P8, Figure 11) montre une interaction Groupe x Lexicalité significative ( $F(1,28)=5.2, p<.05$ ). Dans le groupe contrôle, l'amplitude moyenne du composant N200 est plus large pour les mots que pour les pseudomots alors que le patron de résultats inverse est observé chez les dyslexiques.

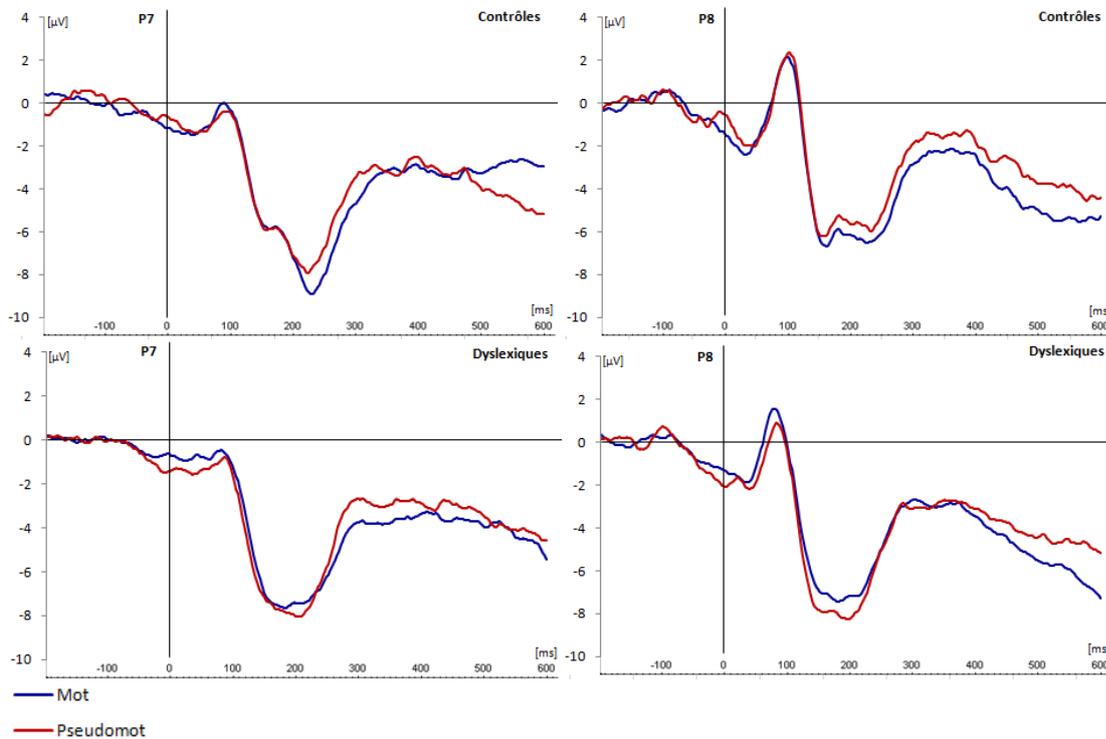


Figure 11. Tracés ERP enregistrés dans le format horizontal au niveau du site ventral (hémisphère gauche: P7; hémisphère droit: P8) pour chaque groupe et type de stimulus.

L'analyse réalisée au niveau des sites occipito-pariétaux (i.e., P3-P4, Figure 12) révèle une absence d'interaction Groupe x Lexicalité ( $F < 1$ ) mais un effet de Lexicalité significatif ( $F(1,28)=5.4, p < .05$ ). Les amplitudes du composant N200 sont plus négatives pour les pseudomots que pour les mots dans les deux groupes de sujets. L'effet de l'Hémisphère est aussi significatif, avec de plus larges négativités du composant N200 dans l'hémisphère gauche que dans l'hémisphère droit ( $F(1,28)=4.9, p < .05$ ).

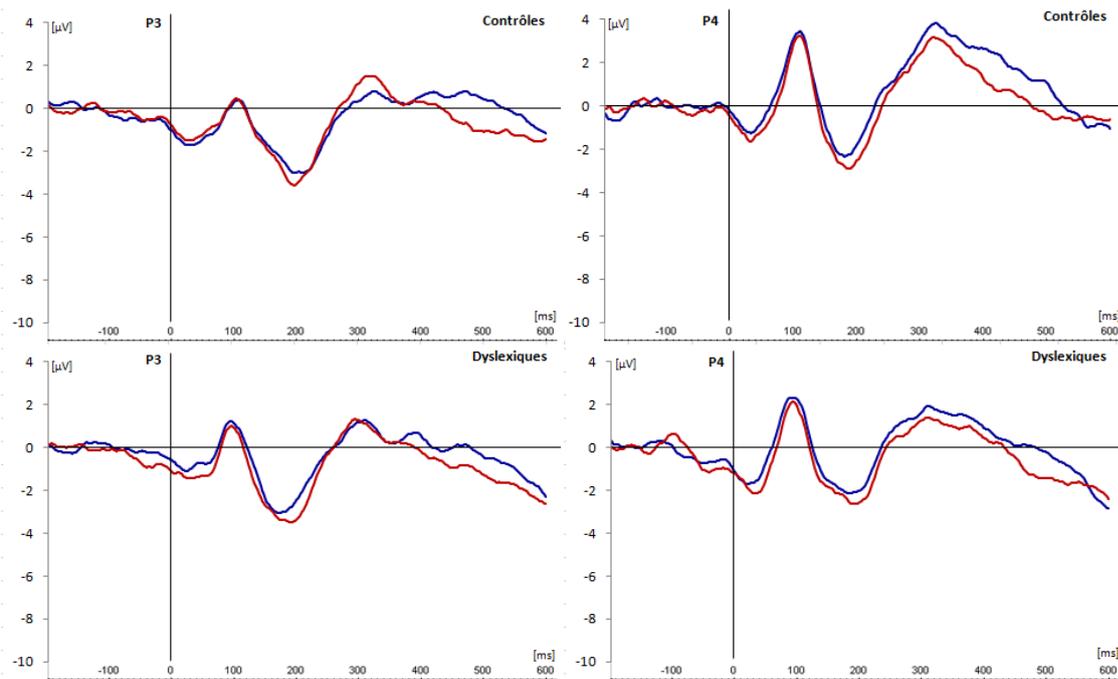


Figure 12. Tracés ERP enregistrés dans le format horizontal au niveau du site dorsal (hémisphère gauche: P3; hémisphère droit: P4) pour chaque groupe et type de stimulus.

### Format vertical

L'analyse réalisée au niveau des sites occipito-temporaux (i.e., P7-P8) du premier composant, la N100 (Figure 13), met en évidence une interaction Groupe x Lexicalité x Hémisphère significative ( $F(1,28)=7.3, p<.05$ ). Des comparaisons planifiées montrent que l'interaction Lexicalité x Hémisphère est absente chez les contrôles ( $F(1,28)=1.3, p>.1$ ). Dans ce groupe, les amplitudes du composant N100 sont similaires entre les mots et les pseudomots au niveau des deux hémisphères. L'interaction Lexicalité x Hémisphère est en revanche significative chez les dyslexiques ( $F(1,28)=7.6, p<.05$ ). Dans ce groupe, les amplitudes du composant N100 sont plus négatives pour les mots que pour les pseudomots dans l'hémisphère gauche alors que le patron est inversé dans l'hémisphère droit. Enfin, les analyses montrent aussi un effet significatif de l'Hémisphère, avec des amplitudes plus négatives dans l'hémisphère droit que dans l'hémisphère gauche ( $F(1,28)=4.6, p<.05$ ).

Toujours au niveau occipito-temporal, l'analyse du second composant, la N200 (Figure 13) met en évidence une interaction Groupe x Lexicalité x Hémisphère significative ( $F(1,28)=7.5$ ,  $p<.05$ ). Des comparaisons planifiées montrent que l'interaction Lexicalité x Hémisphère est absente chez les contrôles ( $F<1$ ). Dans ce groupe, les amplitudes de la N200 sont similaires pour les mots et les pseudomots dans les deux hémisphères. L'interaction Lexicalité x Hémisphère est par contre significative chez les dyslexiques ( $F(1,28)=13.1$ ,  $p<.001$ ): le composant N200 est plus ample pour les mots que pour les pseudomots dans l'hémisphère gauche alors que le patron est inversé dans l'hémisphère droit.

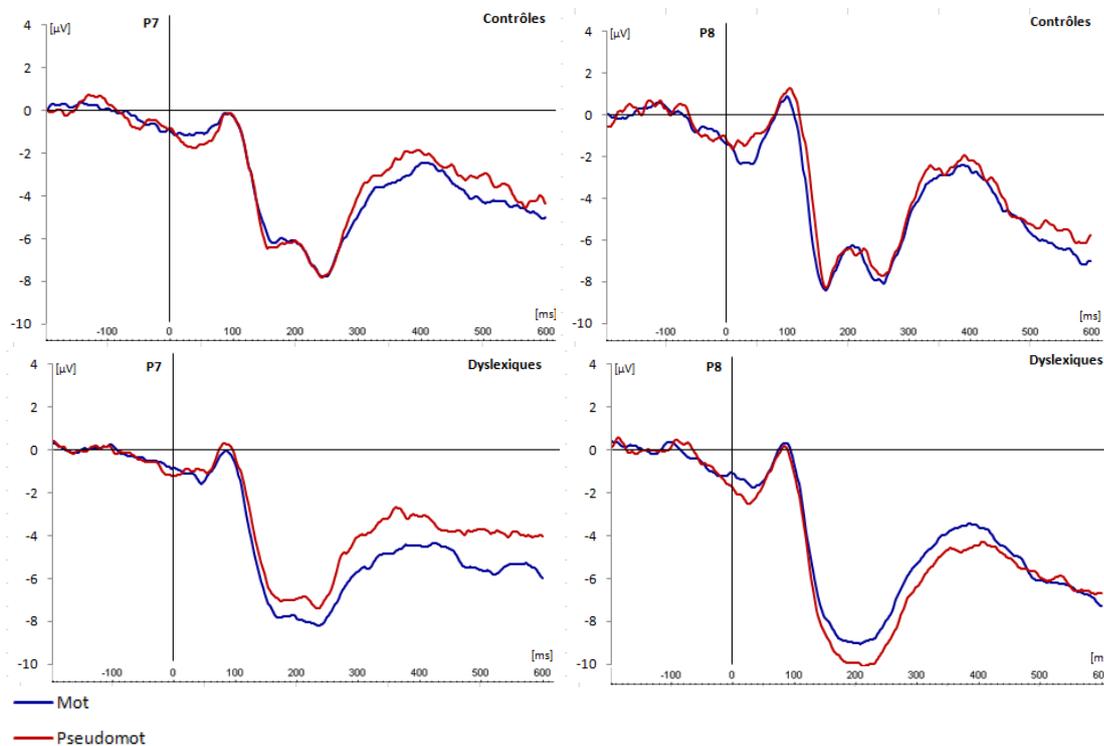


Figure 13. Tracés ERP enregistrés dans le format vertical au niveau du site ventral (hémisphère gauche: P7; hémisphère droit: P8) pour chaque groupe et type de stimulus.

L'analyse réalisée au niveau des sites occipito-pariétaux sur le composant N100 (Figure 14), ne révèle aucun effet significatif.

L'analyse du composant N200 ne montre ni effet simple ni d'interaction. En revanche et comme observé sur les tracés, les amplitudes du composant N200 sont plus négatives pour les pseudomots que pour les mots au niveau de l'hémisphère gauche pour les deux groupes de sujets ( $F(1,28)=6.5, p<.05$ ).

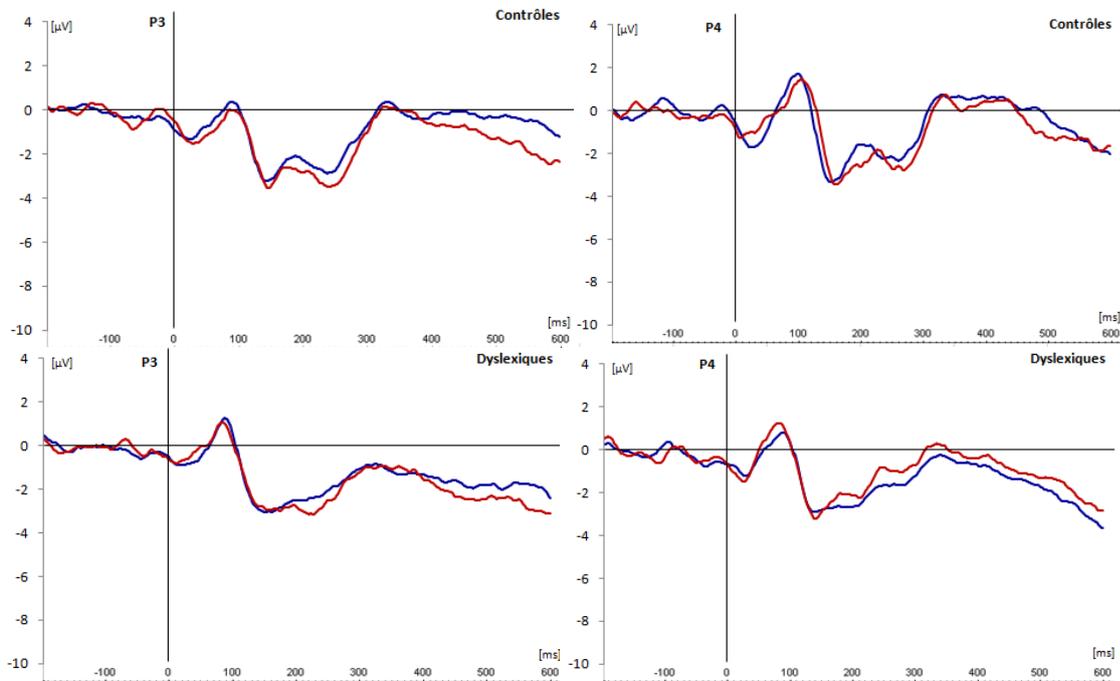


Figure 14. Tracés ERP enregistrés dans le format vertical au niveau du site dorsal (hémisphère gauche: P3; hémisphère droit: P4) pour chaque groupe et type de stimulus.

Une analyse de la latence des pics a été réalisée pour chaque format (i.e., horizontal, vertical), avec un facteur intergroupe (i.e., Groupe: contrôles vs. dyslexiques) ainsi que trois facteurs intragroupes (i.e., Région: ventrale vs. dorsale; Lexicalité: mot vs. pseudomot; Hémisphère: gauche vs. droit). Les analyses montrent uniquement un effet significatif de la région sur la latence du composant N100 dans le format vertical ( $F(1,28)=15.1, p<.001$ ). Les latences du composant N100 sont plus précoces au niveau de la voie dorsale que de la voie ventrale lorsque les stimuli sont présentés verticalement.

### 3. Discussion

L'objectif de cette première étude était de mesurer les implications des voies ventrale et dorsale lors du traitement des stimuli écrits chez des adultes dyslexiques. Les données comportementales montrent tout d'abord une difficulté marquée à réaliser la tâche chez les sujets dyslexiques, qui présentent des latences de réponses ainsi qu'un taux d'erreur supérieurs aux sujets contrôles, et ce quel que soit le format. De plus et en accord avec des résultats antérieurs (Rack et al., 1992; Sprenger-Charolles et al., 2000), les performances des sujets dyslexiques sont particulièrement altérées pour le traitement des pseudomots par rapport aux sujets contrôles. Ce résultat, conjointement au déficit de dénomination des sujets dyslexiques, témoigne d'un trouble phonologique au sein de ce groupe. Les sections suivantes discutent des étapes traitements au niveau des voies ventrale et dorsale chez nos deux groupes de sujets dans chacun des deux formats.

#### Format horizontal

Lorsque les stimuli sont présentés dans un format familier, le groupe contrôle présente un effet de lexicalité au niveau de la voie ventrale. De plus larges négativités occipito-temporales sont en effet enregistrées pour les mots que pour les pseudomots. L'effet de lexicalité observé au niveau de la voie ventrale témoigne d'un traitement distinct des stimuli écrits au sein de cette voie. La reconnaissance des mots familiers repose en effet sur un accès au lexique, ce qui n'est pas le cas des pseudomots. Nos résultats montrent en outre que l'accès au lexique est particulièrement précoce chez les lecteurs experts. La présence d'un effet de lexicalité aussi précoce n'est pas stable dans la littérature (pour une revue, voir Maurer & McCandliss, 2007). De plus, le sens de l'effet de lexicalité est variable d'une étude à l'autre. Certains travaux ont ainsi rapporté un effet de lexicalité allant dans le sens opposé à celui observé dans notre étude (Dujardin et al., 2011; Shaul et al., 2012) tandis que d'autres travaux

ont décrit un effet de lexicalité similaire au nôtre (Maurer, Brandeis, & McCandliss, 2005b; Proverbio, Zani, & Adorni, 2008; Rosazza et al., 2009).

Un effet de lexicalité est également présent au niveau de la voie ventrale dans le groupe de sujets dyslexiques. Le sens de cet effet est opposé par rapport au groupe contrôle, avec de plus larges négativités occipito-temporales pour les pseudomots que pour les mots. Cette différence d'effet de lexicalité observée entre nos deux groupes suggère que l'analyse de stimuli écrits présentés dans un format familier repose sur des mécanismes distincts dès les toutes premières étapes de traitement. Des différences d'effet de lexicalité sur l'activité de la voie ventrale ont déjà été rapportées chez des adultes dyslexiques en ERP (Dujardin et al., 2011; Shaul et al., 2012) et chez des enfants dyslexiques en IRMf (Van der Mark et al., 2009). Le sens des différences n'est cependant pas stable d'une étude à l'autre, avec un effet de lexicalité en sens opposé chez les sujets dyslexiques par rapport aux sujets contrôles (Dujardin et al., 2011) ou une absence d'effet de lexicalité chez les sujets dyslexiques (Shaul et al., 2012; Van der Mark et al., 2009). Nos résultats apportent un argument supplémentaire en faveur d'une spécialisation différente de la voie ventrale pour le traitement des stimuli écrits chez les adultes dyslexiques. Cette différence de spécialisation témoigne d'un accès au lexique distinct chez ces sujets et pourrait expliquer leurs latences de réponses globalement ralenties.

Il est intéressant de remarquer que la topographie de l'effet de lexicalité, habituellement latéralisée à gauche (Dujardin et al., 2011; Rosazza et al., 2009), est observée de façon bilatérale dans nos deux groupes. Ce profil d'activation bilatéral a aussi été rapporté dans une récente étude d'IRMf mesurant l'implication de la voie ventrale en réponse à des stimuli présentés dans des formats visuels familiers et non familiers (Cai, Paulignan, Brysbaert, Ibarrola, & Nazir, 2009). Dans cette étude, les différents formats de présentation apparaissaient dans des blocs séparés. Les résultats ont montré des activations de la voie

ventrale limitées à l'hémisphère gauche pour le format familier tandis que les activations étaient bilatérales pour le format inhabituel. L'absence de latéralisation gauche de l'effet de lexicalité observée dans notre étude pourrait donc être en partie liée à notre design expérimental, avec l'alternance aléatoire des deux formats de présentation.

Un effet de lexicalité est également observé au niveau de la voie dorsale. Les deux groupes de sujets montrent un effet de lexicalité similaire, avec de plus fortes négativités occipito-pariétales pour les pseudomots que pour les mots. De plus, les négativités sont globalement plus amples dans l'hémisphère gauche que dans l'hémisphère droit. Des implications privilégiées du cortex pariétal inférieur gauche pour le décodage phonologique des pseudomots relativement aux mots ont été décrites dans la littérature (Catinelli et al., 2012; Price et al., 1996; Pugh et al., 2001). L'effet de lexicalité observé dans notre étude au niveau dorsal pourrait donc être attribué à la différence de traitement, en termes de décodage phonologique, qui réside entre des stimuli non familiers (i.e., des pseudomots) et des mots familiers (Cohen & Dehaene, 2009). Il est intéressant de remarquer que ce traitement phonologique est préservé chez des sujets dyslexiques présentant un déficit phonologique au niveau comportemental. Une préservation des étapes de traitement phonologiques précoces (i.e., composants N200 et P200), ont déjà été rapportés chez des adultes dyslexiques caractérisés par des troubles phonologiques au niveau comportemental (Savill & Thierry, 2011a; 2011b; 2012). Ces études ont en revanche mis en évidence des déficits au niveau d'étapes de traitement phonologique plus tardives qui n'étaient pas mesurées dans notre étude, telles que l'intégration et la maintenance des informations phonologiques (i.e., composant P600) et l'orientation de l'attention vers les correspondances lettres-sons (i.e., composant P3a).

## Format vertical

En ce qui concerne le format vertical, nous nous attendions à observer principalement des différences entre nos deux groupes au niveau de la voie dorsale. Le traitement de mots présentés dans des formats inhabituels sollicite en effet des processus attentionnels et phonologiques sous-tendus par la voie dorsale et rapportés comme étant déficitaires chez les lecteurs dyslexiques. Les résultats observés au niveau de la voie dorsale sont donc abordés en premier.

Dans le groupe contrôle, le traitement des stimuli présentés verticalement implique deux composants (i.e., la N100 et la N200) alors qu'un seul composant (i.e., la N200) est observé pour le format horizontal. Des processus cognitifs différents pourraient être impliqués en fonction du format visuel, suggérant le passage d'un traitement en parallèle pour le format horizontal à un traitement sériel pour le format vertical. Cette conclusion est appuyée par l'augmentation globale des latences de réponses et du taux d'erreurs dans le format vertical par rapport au format horizontal. Les deux composants observés pour le format vertical dans le groupe de sujets contrôles semblent en revanche fusionnés en un large composant dans le groupe de sujets dyslexiques. Ce profil est visible à la fois sur les tracés des grandes moyennes ainsi que sur la RMS. Nous avons en outre observé ce résultat de façon individuelle auprès de l'ensemble des sujets dyslexiques. Une hypothèse interprétative de ce résultat pourrait être une durée prolongée du composant N100. Ce composant est classiquement associé à des processus attentionnels tels que l'orientation de l'attention et la facilitation du traitement des stimuli pertinents (Luck et al., 1990), ou le déploiement attentionnel (Wimmer et al., 2002). Des implications de la voie dorsale pour des processus attentionnels ont en outre pu être mises en évidence en MEG (Pammer et al., 2006) ainsi qu'en TMS (Laycock et al., 2009) à des latences similaires lors du traitement de stimuli écrits. Le composant N100 que

nous observons au niveau de la voie dorsale peut donc être associé à une étape de traitement attentionnel. Deux résultats de notre étude soutiennent cette association. Tout d'abord, les latences du composant N100 sont plus précoces au niveau de la voie dorsale par rapport à la voie ventrale. Le déplacement de l'attention et la sélection des groupes de lettres au niveau de la voie dorsale aurait en effet lieu avant qu'un traitement de ces groupes de lettres ne soit réalisé au niveau la voie ventrale. Deuxièmement, aucun effet de lexicalité n'a pu être observé sur les amplitudes du composant N100 au niveau de la voie dorsale. Le traitement attentionnel impliqué dans le décodage sériel des stimuli écrits pourrait en effet être similaire entre les mots et les pseudomots, compte tenu de l'absence de familiarité du format.

En définitive, la durée prolongée du composant N100 observée chez les sujets dyslexiques est en accord avec le ralentissement du déplacement attentionnel qui leur est associé (Hari & Renvall, 2001) et qui a notamment été rapporté au niveau comportemental dans des tâches de clignement attentionnel (Dispaldro et al., 2012; Facoetti et al., 2008). Des anomalies au niveau du composant N100 ont en outre été décrites chez des sujets dyslexiques dans une tâche de lecture silencieuse (Wimmer et al., 2002). Dans cette étude, des différences étaient observées uniquement pour le traitement des pseudomots, ce qui a conduit les auteurs à rattacher leurs résultats à un déficit de l'implication de l'attention pour l'activation des unités phonologiques. Il a en effet été suggéré qu'un ralentissement du déplacement attentionnel pourrait perturber la segmentation des séquences de lettres en groupes de lettres, ce qui aurait pour effet de compromettre le décodage phonologique (Facoetti et al., 2006; Facoetti et al., 2008; Vidyasagar & Pammer, 2010). Nos résultats ne montrent pourtant pas chez les sujets dyslexiques d'altération dans l'étape de traitement phonologique, indexée par le composant N200 au niveau dorsal. Ces derniers présentent en effet, comme les sujets contrôles, de plus larges amplitudes du composant N200 pour les pseudomots que pour les mots, spécifiquement dans l'hémisphère gauche. La latéralisation gauche de l'effet soutient

l'association de cet effet à un traitement phonologique (Cattinelli et al., 2012; Pugh et al., 2001). Cet effet, observé dans les deux groupes, est le second argument de l'étude 1 en faveur d'une préservation de l'activation précoce des représentations phonologiques sous-tendue par la voie dorsale chez les sujets dyslexiques. Le ralentissement du déplacement attentionnel observé dans ce groupe ne serait donc pas associé à une altération de l'activation des unités phonologiques.

Concernant la voie ventrale, aucun effet de lexicalité n'a pu être mis en évidence dans le groupe contrôle. Ce résultat est en accord avec une récente étude de décision lexicale investiguant l'effet de lexicalité en fonction de la familiarité du format de présentation sur le composant N170, associé à l'activité de la voie ventrale (Kim & Straková, 2012). Un effet de lexicalité a pu être mis en évidence pour le format de présentation familier tandis que cet effet disparaissait pour les stimuli écrits ayant subi une rotation. Les stimuli présentés dans un format visuel non familier impliqueraient un décodage sériel au cours duquel la voie ventrale serait sollicitée pour reconnaître l'identité des lettres ou des groupes de lettres qui composent les stimuli écrits. Ce traitement purement orthographique serait donc similaire pour les mots et les pseudomots.

A l'inverse du groupe contrôle, un effet de lexicalité est présent chez les sujets dyslexiques au niveau de la voie ventrale. Cet effet de lexicalité diffère selon l'hémisphère: alors que les amplitudes des composants ERP sont plus négatives pour les mots que pour les pseudomots dans l'hémisphère gauche, les négativités sont plus amples pour les pseudomots que pour les mots dans l'hémisphère droit. Ce résultat indique un déficit du traitement rapide des lettres ou des groupes de lettres au niveau de la voie ventrale chez les sujets dyslexiques. Deux opérations cognitives impliquées dans ce processus pourraient être altérées.

Il est tout d'abord possible que le processus altéré se situe au niveau de la voie ventrale. Tandis que dans le format horizontal, les sujets dyslexiques présentent des anomalies de

reconnaissance de la forme globale des mots; dans le format vertical, le traitement expert des lettres ou des groupes de lettres pourrait être altérée. Des travaux se sont intéressés à l'émergence d'un traitement spécialisé des stimuli écrits (lettres vs. symboles) au niveau de la voie ventrale à travers le composant N170. La spécialisation de la N170 émerge dans les deux ans qui suivent le début de l'apprentissage de la lecture chez des normolecteurs (Maurer et al., 2006; Maurer et al., 2007). En revanche, le traitement expert des stimuli écrits est toujours absent chez les sujets dyslexiques au bout de quelques années de pratique de lecture (Ajauro et al., 2012; Kronschnabel et al., 2013) et même à l'âge adulte (Helenius et al., 1999). Il est donc possible que dans notre groupe de sujets dyslexiques, une altération du traitement expert des stimuli écrits ait compromis l'analyse rapide des groupes de lettres. De plus, l'effet de lexicalité observé chez les sujets dyslexiques est bilatéral. Des activations bilatérales de la voie ventrale en réponse aux stimuli écrits sont une caractéristique des lecteurs débutants (Maurer et al., 2005a). Ce n'est que plus tardivement, après quelques années d'entraînement en lecture, que les activations de la voie ventrale se latéralisent à gauche (Maurer et al., 2006; Maurer et al., 2007). Nos résultats peuvent donc être interprétés comme le signe d'une altération du traitement expert de l'écrit chez les lecteurs dyslexiques.

Un déficit attentionnel a également pu compromettre le traitement expert des lettres/groupes de lettres au niveau de la voie ventrale chez les sujets dyslexiques. La durée prolongée du composant N100 observée dans ce groupe pourrait correspondre à un ralentissement du déplacement attentionnel. La reconnaissance des groupes de lettres au niveau de la voie ventrale implique une sélection préalable des groupes de lettres ainsi qu'un déplacement attentionnel d'un groupe de lettres à l'autre au niveau de la voie dorsale. Une altération de ce processus a donc également pu compromettre le traitement sériel chez les sujets dyslexiques, qui ont du mettre en place un mécanisme de compensation pour traiter les stimuli présentés dans un format non familier.

#### **4. Conclusion et transition**

Les résultats de cette première étude révèlent des différences entre nos deux groupes de sujets au niveau des deux voies impliquées lors du traitement des stimuli écrits. Au niveau de la voie ventrale, des différences sont observées pour les deux formats de présentation. Les sujets dyslexiques sont en effet caractérisés par un accès au lexique distinct dans le format horizontal, tandis que le traitement expert des lettres/groupes de lettres est altéré dans le format vertical. En ce qui concerne la voie dorsale, les résultats peuvent être interprétés comme un ralentissement du déplacement de l'attention chez les sujets dyslexiques tandis que le traitement phonologique précoce semble préservé.

Dans cette étude, les résultats montrent des spécificités de traitement des stimuli écrits chez les lecteurs dyslexiques mais ne permettent pas de déterminer si ces spécificités leurs sont propres où si elles sont une caractéristique des individus présentant un faible niveau de lecture. L'objectif de l'étude 2 est de déterminer si les résultats observés dans notre première étude sont spécifiques à la dyslexie. Pour ce faire, nous avons comparé les résultats des groupes de sujets contrôles et de sujets dyslexiques de la présente étude à un groupe de sujets mauvais lecteurs, appariés avec les sujets dyslexiques sur le niveau de lecture.

## **II. Étude 2. Appariement sur le niveau de lecture: les adultes mauvais lecteurs**

### **1. Introduction**

La plupart des études investiguant la dyslexie développementale combinent un design d'appariement sur l'âge et sur le niveau de lecture (Backman, Mamen, & Ferguson, 1984; Bryant & Goswami, 1986). Les différences observées à partir d'un design d'appariement sur l'âge peuvent résulter des différences d'expérience de lecture qui résident entre les deux groupes. Le design d'appariement sur le niveau de lecture permet de mieux isoler les caractéristiques des processus cognitifs des normolecteurs et des lecteurs dyslexiques. Si les déficits observés dans l'étude précédente sont bien une caractéristique propre à la dyslexie, ces altérations devraient être absentes chez des sujets contrôles présentant un faible niveau de lecture. L'objectif de cette étude a donc été de comparer les processus sous-tendus par les voies ventrale et dorsale lors du traitement des stimuli écrits entre un groupe de sujets mauvais lecteurs et nos groupes de sujets dyslexiques et lecteurs experts de l'étude 1. Bien qu'étant appariés avec le groupe de sujets dyslexiques sur le niveau de lecture, ces sujets mauvais lecteurs ne présentaient pas d'histoire personnelle ou familiale de dyslexie. Si les altérations observées au niveau des voies ventrale et dorsale chez les sujets dyslexiques de l'étude 1 sont liées à un faible niveau de lecture, on devrait observer des profils de résultats similaires entre les sujets dyslexiques et les mauvais lecteurs. Si ces aspects sont en revanche le signe d'une spécialisation atypique des mécanismes de traitement des stimuli écrits propre à la dyslexie, les mauvais lecteurs devraient présenter un patron de résultats similaire aux lecteurs experts. Un tel résultat indiquerait que la dyslexie est le résultat d'anomalies cérébrales spécifiques et qu'elle ne correspond pas à une position particulière d'un continuum (Frith, 2001).

## 2. Méthode

### Participants

11 mauvais lecteurs (5 femmes et 6 hommes, moyenne d'âge de 25.4 ans,  $\pm$  4.1 ans) ont participé à l'étude 2. Ils étaient appariés avec le groupe de sujets dyslexiques sur le niveau de lecture. Aucun des mauvais lecteurs n'avait d'histoire personnelle ou familiale de dyslexie développementale ou d'un autre trouble des apprentissages (e.g., dysorthographe, dysphasie). De plus, aucun des sujets de ce groupe n'avait bénéficié d'une remédiation de lecture auprès d'un orthophoniste. Les données du groupe de mauvais lecteurs ont été comparées à celles de 13 sujets dyslexiques (7 femmes et 6 hommes, moyenne d'âge de 26.1 ans,  $\pm$  5.9 ans), et de 13 sujets contrôles (7 femmes et 6 hommes, moyenne d'âge de 26.6 ans,  $\pm$  4.4 ans) de l'étude précédente. 3 sujets dyslexiques ont été exclus car ils n'atteignaient pas au moins le 75<sup>ème</sup> rang centile aux matrices progressives de Raven tandis qu'un sujet contrôle a été exclu car il n'atteignait pas le score maximal dans le test de lecture. Comme détaillé dans le Tableau 2, les trois groupes sont appariés sur l'âge chronologique, la durée des études supérieures, ainsi que l'intelligence non verbale. De plus, les groupes de sujets mauvais lecteurs et dyslexiques ne diffèrent pas dans les mesures relatives au niveau de lecture ou aux habitudes de lecture. Les deux groupes présentent en revanche un niveau de lecture inférieur par rapport au groupe contrôle, qu'il s'agisse des données brutes (i.e., latences de lectures et nombre d'erreurs) ou de l'âge normé de lecture, pour lequel les sujets dyslexiques présentent un retard d'en moyenne 32 mois et les mauvais lecteurs de 25 mois par rapport aux lecteurs experts. Les sujets dyslexiques et les mauvais lecteurs présentent également des habitudes de lecture inférieures par rapport au groupe contrôle, avec un écart moyen du nombre de livre lu par an de 12 livres pour les sujets dyslexiques et de 10 livres pour les mauvais lecteurs relativement aux lecteurs experts. Les sujets dyslexiques présentent en outre un score de dénomination

inférieur aux deux autres groupes en dénomination d'images et de couleurs et inférieur par rapport aux contrôles en dénomination de chiffres.

Tableau 2. Caractéristiques des groupes.

	Dyslexiques (n = 13)	Mauvais lecteurs (n = 11)	Contrôles (n = 13)	Mauvais lecteurs vs Dyslexiques t(22)	Mauvais lecteurs vs Contrôles t(22)	Dyslexiques vs Contrôles t(24)
Sexe (homme: femme)	6 : 7	6 : 5	6 : 7			
Age (années)	26.1 (± 5.9)	25.4 (± 4.1)	26.6 (± 4.4)	0.3 <i>ns</i>	0.33 <i>ns</i>	-0.03 <i>ns</i>
Durée moyenne des études supérieures	1.6 (± 1.9)	1.9 (± 1.8)	1.8 (± 2.1)	-0.39 <i>ns</i>	0.08 <i>ns</i>	0.29 <i>ns</i>
Matrices de Raven (rang centile)	85.8 (± 10.4)	86.8 (± 14.5)	88.8 (± 9.6)	-0.21 <i>ns</i>	0.41 <i>ns</i>	0.78 <i>ns</i>
<b>Test de lecture de l'Alouette</b>						
Age moyen de lecture normé (mois)	137.8 (± 12.3)	145.2 (± 9.2)	170.1 (± 3.3)	-1.64 <i>ns</i>	9.09***	9.13***
Temps moyen (minutes)	2.2 (± .3)	2 (± .2)	1.6 (± .1)	1.24 <i>ns</i>	-7.84***	-7.38***
Nombre d'erreurs moyen	7.5 (± 4.1)	5.1 (± 1.6)	2.4 (± 2)	1.86 <i>ns</i>	-3.6**	-4.09***
<b>Latences de dénomination (secondes)</b>						
Images	68.1 (± 9.1)	61.8 (± 4.8)	60.5 (± 9)	2.05*	-0.42 <i>ns</i>	-2.12*
Chiffres	43.8 (± 11.2)	41 (± 6.8)	35 (± 8.2)	0.73 <i>ns</i>	-1.62 <i>ns</i>	-2.29*
Couleurs	64.3 (± 12.1)	53.5 (± 9.1)	54.1 (± 7.8)	2.43*	0.15 <i>ns</i>	-2.57*
<b>Habitudes de lecture</b>						
Nombre moyen de livres lus par an	7.1 (± 9.5)	9 (± 10.1)	18.7 (± 13.8)	-0.47 <i>ns</i>	2.05*	2.5*
<b>Remédiation (années)</b>						
Durée moyenne	5.3 (± 2.5)					
Age moyen de début	8.1 (± 2.6)					
Age moyen de fin	13.1 (± 1.6)					

Note: Différence inter-groupes (test t): *ns*, non significatif, \*  $p \leq .05$ , \*\*  $p \leq .01$ , \*\*\*  $p \leq .001$ .

## Stimuli, procédure et analyses ERP

La tâche, la procédure ainsi que les analyses ERP de cette étude sont similaires à celles de l'étude précédente. 4.5% des données des mauvais lecteurs ont été exclues en raison de mauvaises réponses ou de réponses excédant deux écarts-types de la moyenne des TRs. Les grandes moyennes ont été calculées à partir d'une moyenne de 54 essais pour les sujets mauvais lecteurs (58 essais pour le format horizontal et 50 essais pour le format vertical). La RMS des 32 électrodes pour le format horizontal (Figure 15) montre une amplitude maximale du composant N200 au niveau des sites ventraux et dorsaux entre 140 et 260 ms chez les mauvais lecteurs, comme pour les deux autres groupes de sujets. La RMS des 32 électrodes pour le format vertical (Figure 16) met en évidence la succession des composants N100 (130-210 ms) et N200 (210-280 ms) chez les mauvais lecteurs, qui présentent un patron similaire aux contrôles. Chez les dyslexiques en revanche, ces deux composants sont fusionnés en un large composant.

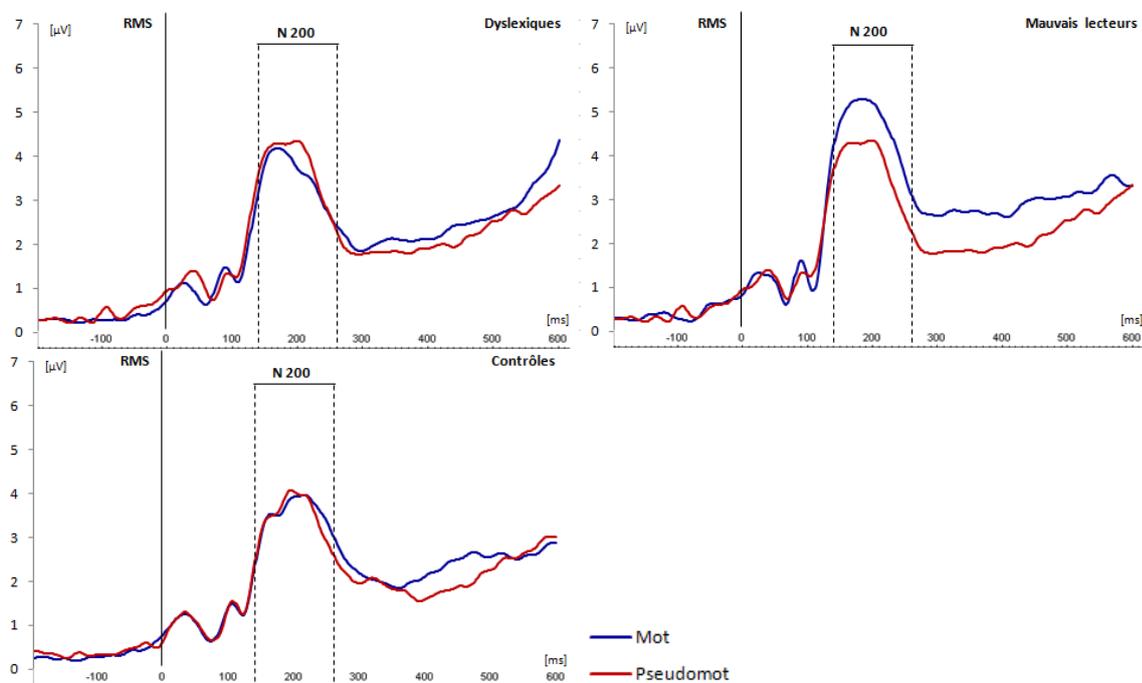


Figure 15. RMS pour chaque groupe et condition dans le format horizontal.

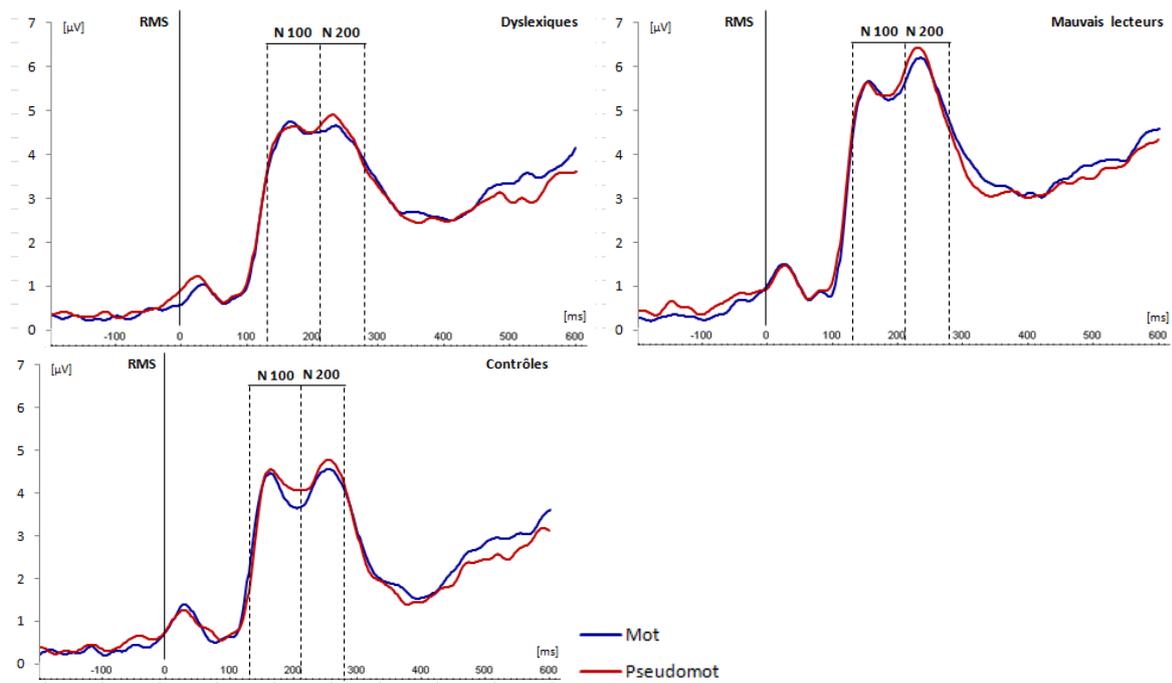


Figure 16. RMS pour chaque groupe et condition dans le format vertical.

### 3. Résultats

#### Résultats comportementaux

Comme dans l'étude 1, deux ANOVA ont été réalisées pour chaque format de présentation (i.e., horizontal, vertical) sur les TRs et le pourcentage d'erreurs. Les analyses comprenaient un facteur intergroupe (i.e., Groupe: dyslexiques vs. mauvais lecteurs vs. contrôles) ainsi qu'un facteur intragroupe (i.e., Lexicalité: mots vs. pseudomots).

#### Format horizontal (Figure 17)

Un effet significatif du Groupe est présent sur les TRs ( $F(1,34)=3.8, p<.05$ ). Des comparaisons planifiées montrent que les latences de réponses des mauvais lecteurs (712 ms) ne diffèrent pas des dyslexiques (795 ms;  $F(1,34)=2.4, p>.1$ ) ni des contrôles (654 ms;  $F(1,34)=1.2, p>.1$ ), l'effet du Groupe étant lié aux différences entre les dyslexiques et les contrôles ( $F(1,34)=7.6, p<.01$ ) déjà rapportées dans l'étude 1. L'effet de Lexicalité et

l'interaction Groupe x Lexicalité ( $F(2,34)=3.6, p<.05$ ) sont aussi significatifs. Les TRs sont plus élevés pour les pseudomots que pour les mots dans les trois groupes de sujets. Des comparaisons planifiées montrent que l'effet de lexicalité observé chez les mauvais lecteurs (597 ms pour les mots, 826 ms pour les pseudomots) ne diffère pas des dyslexiques (667 ms pour les mots, 921 ms pour les pseudomots;  $F<1$ ) ni des contrôles (566 ms pour les mots, 741 ms pour les pseudomots;  $F(1,34)=2.9, p>.1$ ), l'interaction Groupe x Lexicalité étant liée aux différences entre les dyslexiques et les contrôles ( $F(1,34)=7, p<.05$ ) déjà décrites dans l'étude 1.

L'analyse du pourcentage d'erreurs révèle un effet significatif du Groupe ( $F(1,34)=4.1, p<.05$ ). Des comparaisons planifiées montrent que le taux d'erreur des mauvais lecteurs (4.1%) est significativement inférieur à celui des dyslexiques (13.1%;  $F(1,34)=6.4, p<.05$ ) mais qu'il ne diffère pas de celui des contrôles (6%;  $F<1$ ). L'effet de Lexicalité ( $F(1,34)=39.5, p<.001$ ) et l'interaction Groupe x Lexicalité ( $F(1,34)=3.7, p<.05$ ) sont également significatifs. Le taux d'erreur est supérieur pour les pseudomots que pour les mots chez les trois groupes de sujets. Des comparaisons planifiées montrent que l'effet de lexicalité est inférieur chez les mauvais lecteurs (1.8% pour les mots et 10.1% pour les pseudomots) par rapport aux dyslexiques (4.2% pour les mots et 22% pour les pseudomots;  $F(1,34)=4.6, p<.05$ ) alors qu'il est similaire entre les mauvais lecteurs et les contrôles (2.3% pour les mots, 9.7% pour les pseudomots;  $F<1$ ).

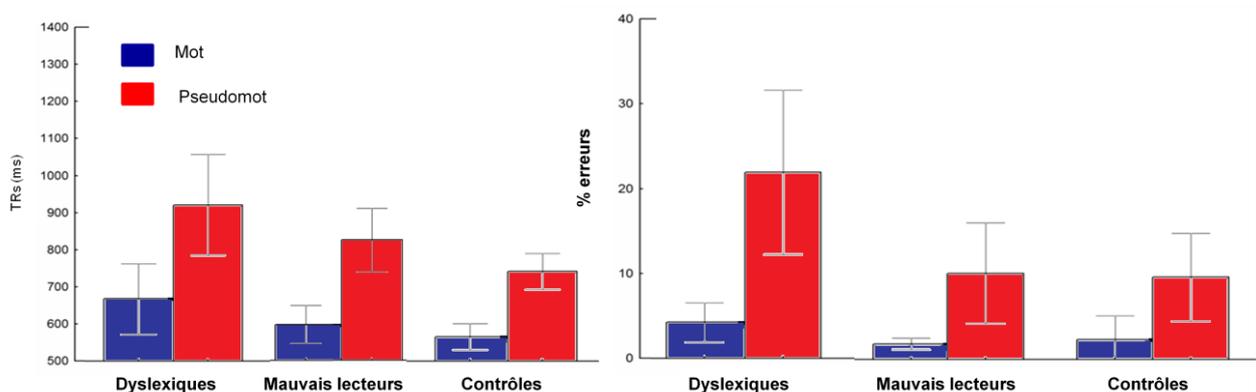


Figure 17. Temps de réaction moyens (TRs) et pourcentage d'erreurs (% erreurs) en fonction du groupe et du type de stimulus pour le format horizontal.

### Format vertical (Figure 18)

L'analyse des TRs dans le format vertical met en évidence un effet tendanciel du Groupe ( $F(1,34)=2.6, p=.08$ ). Des comparaisons planifiées montrent que les latences de réponse des mauvais lecteurs (878) ne diffèrent pas de celles des dyslexiques (1001 ms;  $F(1,34)=2.5, p>.1$ ) ni de celles des contrôles (840 ms;  $F<1$ ). Les analyses montrent aussi un effet de Lexicalité significatif ( $F(1,34)=152.2, p<.001$ ) et une absence d'interaction Groupe x Lexicalité ( $F(1,34)=1.5, p>.1$ ). Les TRs pour les pseudomots sont en effet supérieurs à ceux des mots dans les trois groupes de sujets.

L'analyse du pourcentage d'erreurs montre un effet significatif du Groupe ( $F(1,34)=3.8, p<.05$ ). Des comparaisons planifiées révèlent que le taux d'erreur des mauvais lecteurs (10.6%) est significativement inférieur à celui des dyslexiques (17.7%;  $F(1,34)=3.8, p<.05$ ) alors qu'il ne diffère pas de celui des contrôles (8.6%;  $F<1$ ). L'effet de Lexicalité est également significatif ( $F(1,34)=30.1, p<.001$ ) mais pas l'interaction Groupe x Lexicalité ( $F<1$ ). Les pseudomots induisent plus d'erreurs que les mots dans les trois groupes de sujets.

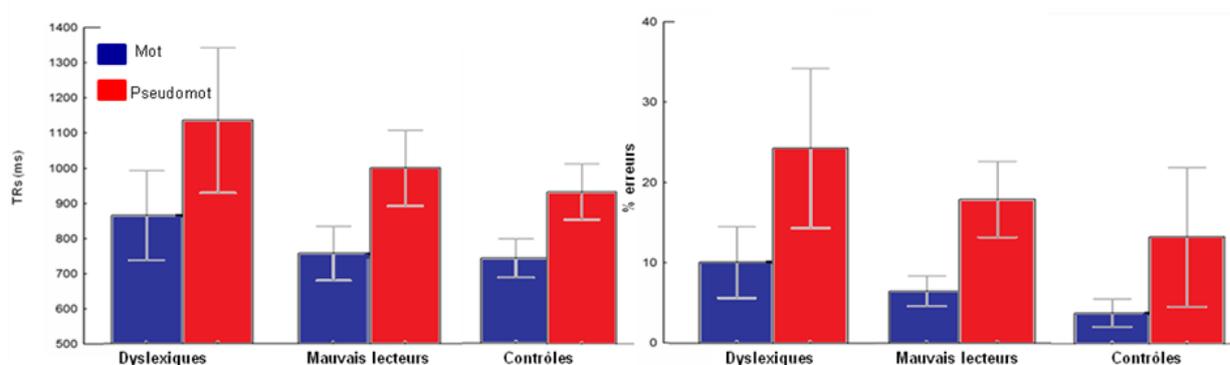


Figure 18. Temps de réaction moyens (TRs) et pourcentage d'erreurs (% erreurs) en fonction du groupe et du type de stimulus pour le format vertical.

### Résultats électrophysiologiques

Comme pour l'étude précédente, les amplitudes moyennes des composants ERP ont été analysées à partir de quatre ANOVA à mesures répétées: une ANOVA pour chaque format visuel de présentation (i.e., horizontal, vertical) et chaque région cérébrale (i.e., ventrale, dorsale). Les analyses comprenaient un facteur intergroupe (i.e., Groupe: contrôles vs. dyslexiques vs. mauvais lecteurs) et deux facteurs intragroupe (i.e., Lexicalité: mots vs. pseudomots; Hémisphère: gauche vs. droite).

#### Format horizontal

Les analyses réalisées au niveau de la voie ventrale (Figure 19) montrent que l'interaction Groupe x Lexicalité est significative ( $F(2,34)=3.8, p<.05$ ). Dans l'étude 1, nous avons montré que l'effet de lexicalité était opposé entre les contrôles (i.e., amplitudes du composant N200 supérieures pour les mots que pour les pseudomots) et les dyslexiques (i.e., amplitudes du composant N200 supérieures pour les pseudomots que pour les mots). Chez les mauvais lecteurs, l'amplitude du composant N200 est similaire pour les mots et les pseudomots. L'effet de Lexicalité ne diffère pas entre les mauvais lecteurs et les dyslexiques ( $F(1,34)=1.2, p>.1$ ) ni entre les mauvais lecteurs et les contrôles ( $F(1,34)=2.7, p>.1$ ), l'interaction Groupe x Lexicalité étant liée aux différences entre les dyslexiques et les contrôles ( $F(1,34)=7.5, p<.05$ ) déjà rapportées dans l'étude 1.

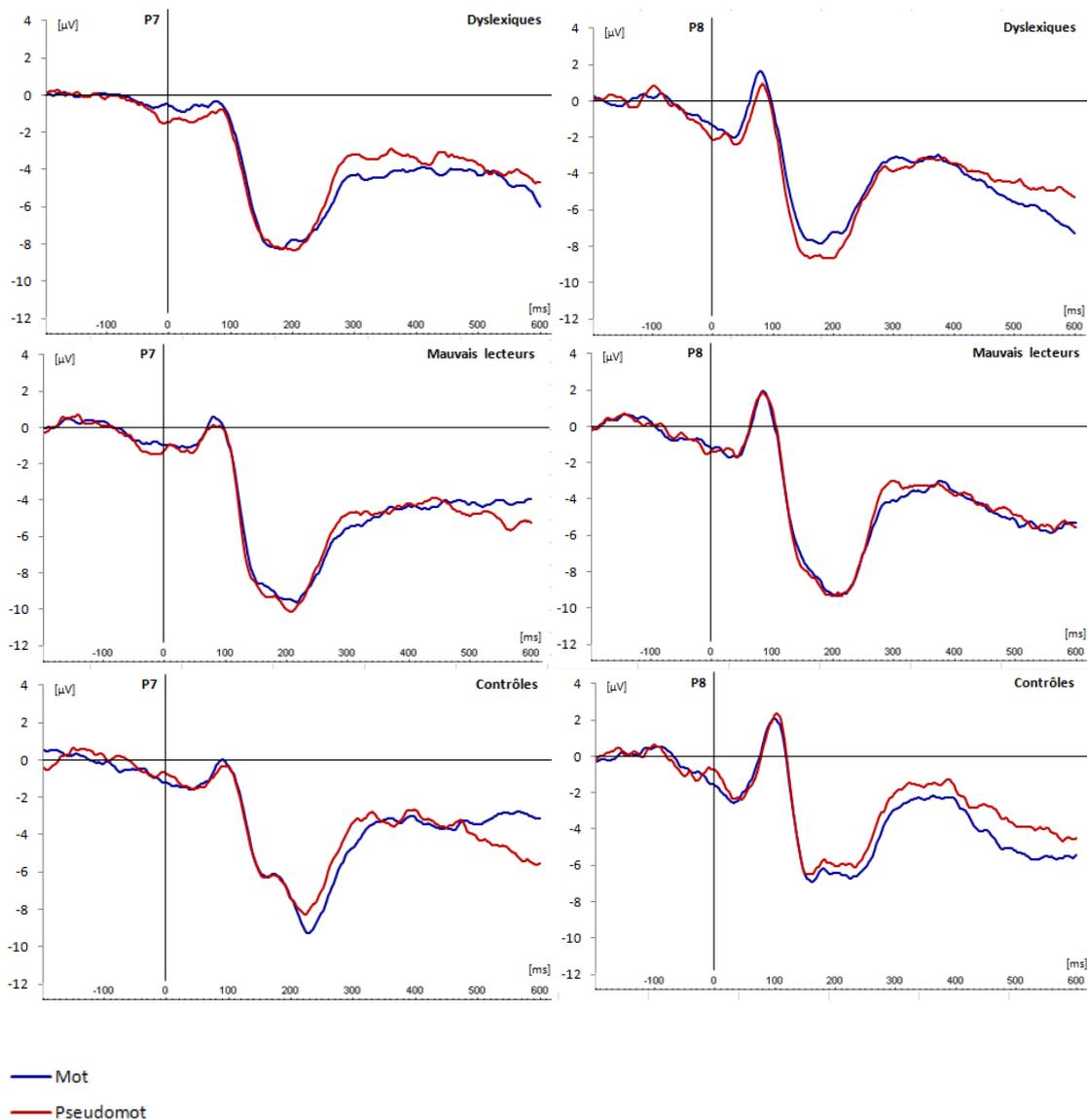


Figure 19. Tracés ERP enregistrés dans le format horizontal au niveau du site ventral (hémisphère gauche: P7; hémisphère droit: P8) pour chaque groupe et type de stimulus.

Les analyses réalisées au niveau de la voie dorsale (Figure 20), révèlent un effet de Lexicalité significatif ( $F(1,34)=4.3, p<.05$ ): les amplitudes du composants N200 sont en effet plus négatives pour les pseudomots que pour les mots. L'interaction Groupe x Lexicalité n'est pas significative ( $F(1,34)=1.4, p>.1$ ).

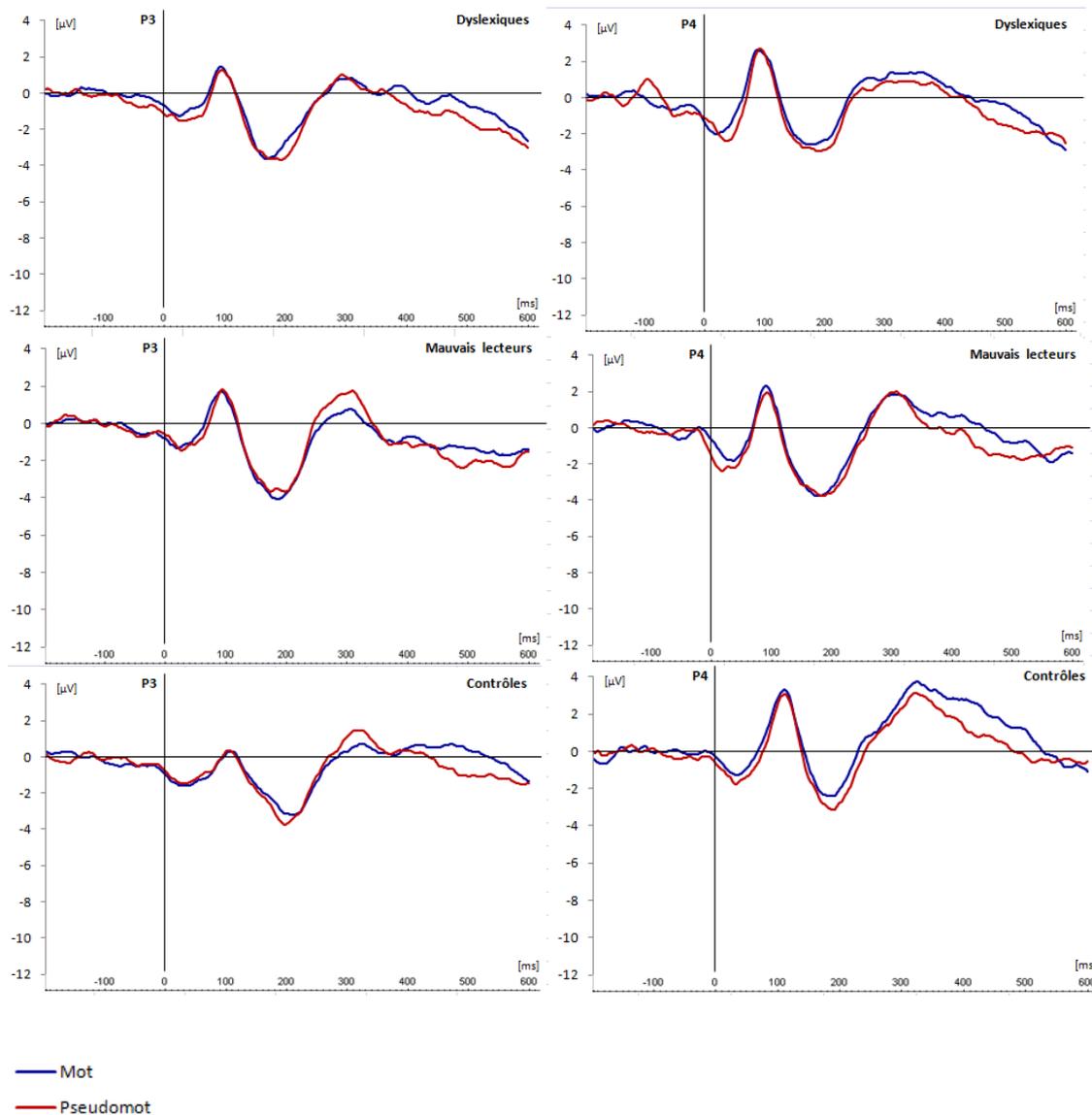


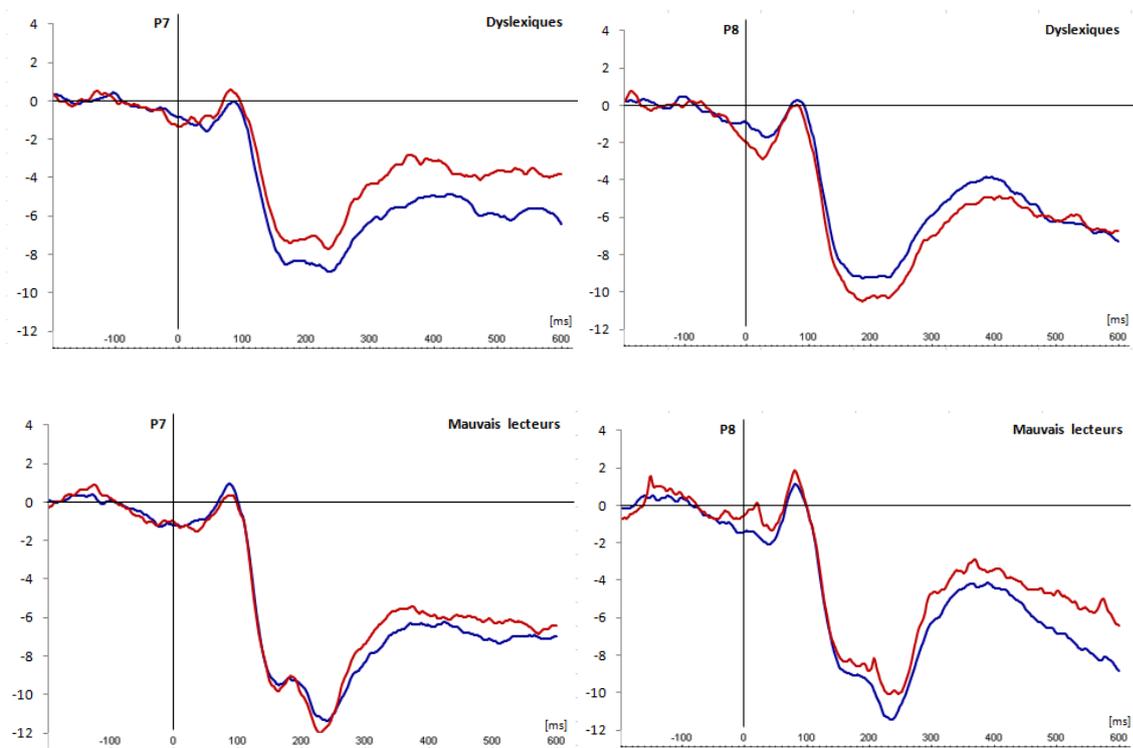
Figure 20. Tracés ERP enregistrés dans le format horizontal au niveau du site dorsal (hémisphère gauche: P3; hémisphère droit: P4) pour chaque groupe et type de stimulus.

### Format vertical

Les analyses réalisées au niveau de la voie ventrale (Figure 21) pour le composant N100 mettent en évidence une interaction Groupe x Lexicalité x Hémisphère significative ( $F(1,34)=7.6, p<.01$ ). Dans l'étude 1, nous avons montré chez les dyslexiques une interaction Lexicalité x Hémisphère, indiquant de plus larges amplitudes du composant N100 pour les mots que pour les pseudomots dans l'hémisphère gauche et le patron inverse dans

l'hémisphère droit. Chez les mauvais lecteurs, l'interaction Lexicalité x Hémisphère est absente ( $F(1,34)=1.5, p>.1$ ), les amplitudes du composant N100 étant similaires pour les mots et les pseudomots. Les mauvais lecteurs présentent donc un patron de résultats identique à celui des contrôles.

L'analyse du composant N200 montre une interaction Groupe x Lexicalité x Hémisphère ( $F(1,34)=9, p<.001$ ). Dans l'étude 1, nous avons montré que les dyslexiques présentaient une interaction Lexicalité x Hémisphère, avec de plus larges amplitudes du composant N100 pour les mots que pour les pseudomots dans l'hémisphère gauche et le patron inverse dans l'hémisphère droit. De façon similaire au groupe contrôle, l'interaction Lexicalité x Hémisphère est absente chez les mauvais lecteurs ( $F(1,34)=2.5, p>.1$ ). Comme c'est illustré sur la figure 21, les mauvais lecteurs présentent uniquement un effet de Lexicalité dans l'hémisphère droit, avec de plus larges amplitudes du composant N200 pour les mots que pour les pseudomots ( $F(1,34)=4.9, p<.05$ ).



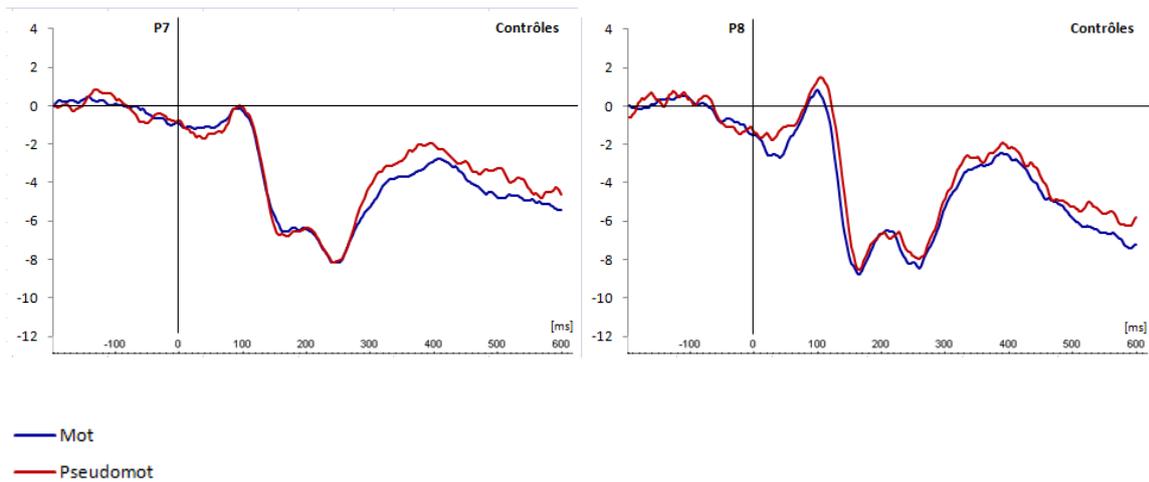


Figure 21. Tracés ERP enregistrés dans le format vertical au niveau du site ventral (hémisphère gauche: P7; hémisphère droit: P8) pour chaque groupe et type de stimulus.

Au niveau de la voie dorsale (Figure 22), l'analyse du composant N100 ne met en évidence aucun effet significatif.

L'analyse du composant N200 ne montre aucun effet simple ou d'interaction. En revanche et comme observé sur les tracés, les amplitudes du composant N200 sont plus négatives pour les pseudomots que pour les mots au niveau de l'hémisphère gauche pour les trois groupes de sujets ( $F(1,34)=3.9, p<.05$ ). Ce résultat est similaire à ceux de notre étude 1.

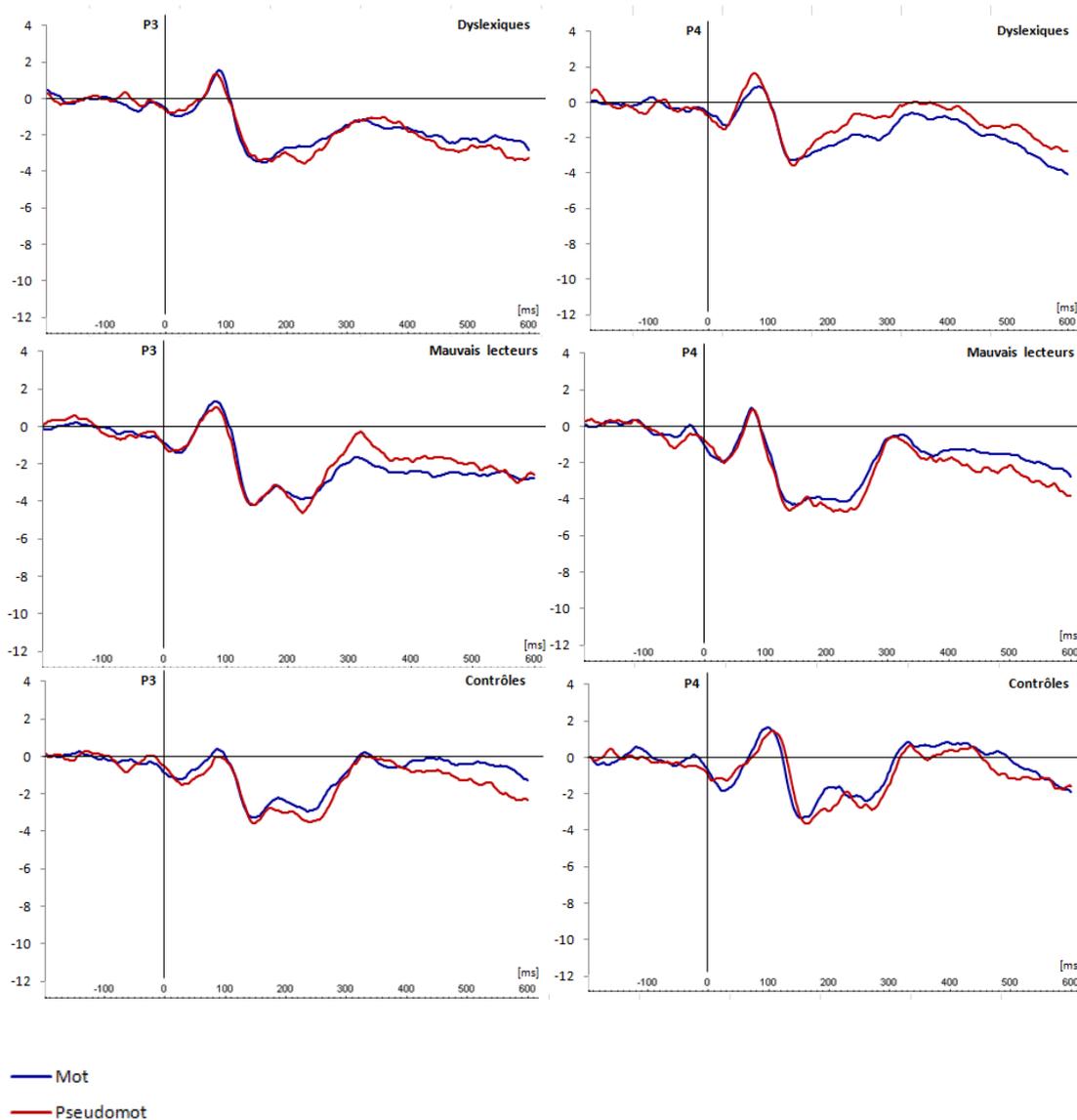


Figure 22. Tracés ERP enregistrés dans le format vertical au niveau du site dorsal (hémisphère gauche: P3; hémisphère droit: P4) pour chaque groupe et type de stimulus.

Une analyse de la latence des pics a été réalisée pour chaque format (i.e., horizontal, vertical), avec un facteur intergroupe (i.e., Groupe: contrôles vs. dyslexiques vs. mauvais lecteurs) et trois facteurs intragroupes (i.e., Région: ventrale vs. dorsale; Lexicalité: mot vs. pseudomot; Hémisphère: gauche vs. droit). Un effet significatif de la région est présent sur l'amplitude du composant N100 dans le format vertical ( $F(1,28)=17.2, p<.001$ ). Les latences

du pic du composant N100 sont plus précoces au niveau de la voie dorsale relativement à la voie ventrale lorsque les stimuli sont présentés verticalement.

#### **4. Discussion**

L'objectif de cette étude était de déterminer si les différences de traitements au niveau des voies ventrale et dorsale rapportées dans l'étude 1 sont une spécificité de la dyslexie ou si elles sont une caractéristique commune aux individus présentant un faible niveau de lecture. Les données comportementales montrent tout d'abord que les latences de réponses ainsi que le taux d'erreurs des mauvais lecteurs ne diffèrent pas du groupe contrôle. La difficulté marquée à réaliser la tâche est donc spécifique aux sujets dyslexiques, qui sont ralentis par rapport aux sujets contrôles et présentent un taux d'erreur plus élevé que les deux autres groupes. De plus, contrairement aux sujets dyslexiques, les mauvais lecteurs ne présentent pas de difficulté à traiter les pseudomots ni des altérations en dénomination par rapport aux sujets contrôles. Les troubles phonologiques décrits chez les lecteurs dyslexiques dans l'expérience 1 leur seraient donc spécifiques.

##### Format horizontal

Au niveau de la voie ventrale, l'effet de lexicalité est absent chez les mauvais lecteurs. Dans ce groupe, le traitement des stimuli écrits au sein de la voie ventrale ne différerait donc pas en fonction de leur lexicalité. Il est important de remarquer que le patron de résultats des mauvais lecteurs ne se distingue d'aucun des deux autres groupes. Seuls les sujets dyslexiques présentent un patron de résultat opposé aux lecteurs experts. Des différences d'accès au lexique ne seraient donc pas une caractéristique des individus ayant un mauvais niveau de lecture. Ces différences pourraient être le signe d'une spécialisation atypique des structures occipito-temporales impliquées dans le traitement expert des stimuli écrits.

Les résultats au niveau de la voie dorsale répliquent ceux de la première étude, traduisant un traitement phonologique distinct entre les stimuli écrits non familiers (i.e., les pseudomots) et les mots connus.

### Format vertical

Comme le groupe contrôle, les mauvais lecteurs présentent une succession de deux composants (i.e., la N100 et la N200) pour le format vertical alors qu'un seul composant est observé pour le format horizontal (i.e., la N100). Ce patron de résultat, visible sur les tracés des grandes moyennes et des RMS est en outre présent de façon individuelle chez chacun des mauvais lecteurs. Des processus cognitifs différents seraient donc impliqués en fonction de la familiarité du format de présentation des stimuli écrits chez les mauvais lecteurs et chez les lecteurs experts. Un traitement en parallèle pourrait ainsi être sollicité pour le format horizontal alors qu'un traitement sériel serait impliqué pour le format vertical. Le groupe de sujets dyslexiques est le seul à présenter une fusion des deux composants pour le format vertical. Comme suggéré dans l'étude 1, ce profil peut être interprété comme un ralentissement du déplacement de l'attention au niveau de la voie dorsale (Hari & Renvall, 2001). L'étude 2 indique en outre que ce potentiel trouble attentionnel est spécifiquement rattaché à la dyslexie.

Concernant les effets de lexicalité au niveau de la voie dorsale, le profil des mauvais lecteurs ne se distingue pas des deux autres groupes. Aucun effet de lexicalité n'est observable sur l'amplitude du composant N100, pouvant indiquer un traitement attentionnel similaire entre les mots et les pseudomots lorsque ces derniers sont présentés dans un format inhabituel. Enfin, comme pour les deux autres groupes, les mauvais lecteurs présentent un effet de lexicalité sur l'amplitude du composant N200 dans l'hémisphère gauche. Le traitement phonologique précoce serait donc également préservé chez les mauvais lecteurs.

Concernant les traitements au niveau de la voie ventrale, les mauvais lecteurs présentent un profil intermédiaire par rapport aux deux autres groupes. Comme les lecteurs experts, les mauvais lecteurs ne présentent pas d'effet de lexicalité sur l'amplitude du composant N100. Ce patron de résultat peut être interprété comme l'implication de la voie ventrale dans le traitement des lettres ou des groupes de lettres qui ne différerait pas en fonction de la familiarité du matériel langagier. Un effet de lexicalité est en revanche observé chez les mauvais lecteurs plus tardivement, au niveau du composant N200. Cet effet est limité à l'hémisphère droit et va dans le sens opposé à l'effet observé chez les sujets dyslexiques. Chez ces derniers, l'effet de lexicalité est plus prononcé puisqu'il est aussi observé à des latences plus précoces et au niveau des deux hémisphères. Comme nous l'avons suggéré dans l'étude 1, l'effet de lexicalité observé au niveau de la voie ventrale pour le format vertical pourrait traduire une altération du traitement expert des groupes de lettres au niveau de cette voie. L'observation d'un effet de lexicalité chez les mauvais lecteurs, bien que ce dernier soit réduit, suggère que cette altération pourrait en partie être commune aux individus présentant un faible niveau de lecture. Comme nous l'avons déjà proposé, l'analyse rapide des lettres/groupes de lettres au niveau de la voie ventrale pourrait être compromise pour deux raisons: 1) un défaut du traitement expert des stimuli écrits au sein de la voie ventrale; et/ou 2) un déficit du traitement attentionnel (i.e., la sélection des groupes de lettres à traiter et le déplacement de l'attention d'un groupe de lettres à l'autre) au sein de la voie dorsale. Il est possible que l'un de ces processus soit fortement déficitaire chez les sujets dyslexiques et seulement légèrement altéré chez les mauvais lecteurs.

En définitive, nos résultats suggèrent des spécificités du traitement des stimuli écrits en fonction de la présence ou non d'un trouble dyslexique au niveau des voies ventrale et dorsale et en fonction du niveau de lecture au niveau de la voie ventrale.

## 5. Conclusion et transition

L'utilisation d'un design d'appariement sur l'âge et sur le niveau de lecture nous a permis d'isoler les spécificités de la dyslexie relativement au traitement des stimuli écrits au sein des voies ventrale et dorsale. Au niveau de la voie ventrale, lorsque les stimuli sont présentés dans un format familier, seuls les sujets dyslexiques présentent des différences dans l'accès au lexique par rapport aux lecteurs experts. Lorsque les stimuli sont présentés dans un format inhabituel, les sujets dyslexiques, ainsi que les mauvais lecteurs dans une moindre mesure, montrent une altération du traitement rapide des groupes de lettres relativement aux lecteurs experts. Cette altération pourrait être liée à un défaut de traitement expert de l'écrit. Une façon de tester cette hypothèse est de mesurer la présence ou non d'une spécialisation de la voie ventrale pour le traitement des stimuli écrits (i.e., par une comparaison lettres vs. symboles). Cet aspect est développé dans l'étude 3.

Au niveau de la voie dorsale, les sujets dyslexiques semblent présenter un ralentissement du déplacement de l'attention (i.e., durée prolongée du composant N100). Ce déficit semble bien caractéristique à ce groupe, puisque les mauvais lecteurs présentent un patron de résultats similaire aux lecteurs experts. Un ralentissement du déplacement attentionnel pourrait en outre avoir compromis le traitement rapide des lettres/groupes de lettres au sein de la voie ventrale dans le format vertical. L'objectif de nos études 4 et 5 est d'explorer ce déficit attentionnel en mesurant plus généralement les processus d'attention visuo-spatiale.

## **Partie 2. L'expertise pour le traitement de l'écrit**

### **Etude 3. La spécialisation du composant N170**

#### **1. Introduction**

Les études 1 et 2 montrent chez des adultes dyslexiques une différence d'accès rapide au lexique ainsi qu'une altération du traitement rapide des groupes de lettres au niveau de la voie ventrale. Ce dernier déficit pourrait en partie être caractéristique des individus présentant un faible niveau de lecture puisqu'il est aussi observé, bien que dans une moindre mesure, dans un groupe de sujets mauvais lecteurs. L'origine de ces altérations pourrait être liée à un défaut du traitement expert des stimuli écrits. L'objectif de cette expérience a été de tester cette hypothèse en étudiant le traitement expert de l'écrit à travers la spécialisation du composant N170. Comme pour l'étude 2, la comparaison d'adultes dyslexiques adultes à des mauvais lecteurs et des lecteurs experts nous a permis d'isoler les spécificités de la dyslexie.

Le composant N170, relié à l'activité du gyrus fusiforme gauche (Brem et al., 2006; Maurer et al., 2005a), a été associé au traitement expert des stimuli écrits (Bentin et al., 1999; Maurer & McCandliss, 2007). Chez les lecteurs experts, les amplitudes du composant N170 sont en effet plus négatives dans l'hémisphère gauche pour des stimuli écrits que pour des stimuli visuels contrôles, tels que des symboles. L'étude du traitement expert de l'écrit à travers la spécialisation du composant N170 trouve actuellement tout son intérêt chez les adultes dyslexiques. Cet aspect n'a en effet jusqu'à présent été exploré que chez des enfants dyslexiques et a en outre amené à des résultats non consensuels. Un premier ensemble d'études longitudinales a tout d'abord mis en évidence un retard de spécialisation du composant N170 chez des enfants dyslexiques (Maurer et al., 2007; Maurer et al., 2011). En effet, alors que cette spécialisation émerge durant les premières étapes de l'acquisition de la

lecture chez des normolecteurs (i.e., 8.3 ans; Maurer et al., 2007), celle-ci se développe plus tardivement (i.e., 11.5 ans) chez des dyslexiques (Maurer et al., 2007; Maurer et al., 2011). Sur la base de ces résultats, il a été proposé que les lecteurs dyslexiques présentent un retard de spécialisation du composant N170. Un second ensemble de résultats va pourtant à l'encontre de cette hypothèse. Une étude récente montre tout d'abord un déficit de spécialisation du composant N170 chez des enfants dyslexiques qui avaient pourtant quelques années de pratique de lecture (i.e., 10.7 ans; Araujo et al., 2012). De plus, des travaux menés chez des adolescents en IRMf (Kronshabel et al., 2013) ainsi que chez des adultes en MEG (Helenius et al., 1999; Salmelin et al., 1996) et en IRMf (Paulesu et al., 2001) confirment également l'idée que le défaut du traitement expert de l'écrit des dyslexiques pourrait ne pas se limiter à la période initiale d'acquisition de la lecture. Notre étude s'inscrit dans ce débat et a pour objectif de déterminer: 1) si un défaut du traitement expert des stimuli écrits persiste chez des adultes dyslexiques en les comparant à des sujets contrôles appariés sur l'âge chronologique (i.e., des lecteurs experts); et 2) si ce déficit est spécifique aux lecteurs dyslexiques ou s'il est uniquement lié à leur faible niveau de lecture, par l'inclusion d'un groupe contrôle apparié avec les sujets dyslexiques sur le niveau de lecture (i.e., des mauvais lecteurs).

## **2. Méthode**

### Participants

38 adultes droitiers ont participé à l'étude: 12 dyslexiques (7 femmes et 5 hommes, moyenne d'âge de 27.7 ans  $\pm$  6.8 ans), 12 mauvais lecteurs (7 femmes et 5 hommes, moyenne d'âge de 23.3 ans,  $\pm$  5.1 ans) et 14 contrôles (8 femmes et 6 hommes, moyenne d'âge de 25.5 ans  $\pm$  4.3 ans). Les sujets dyslexiques ont tous été diagnostiqués par un orthophoniste pendant

l'enfance et ont suivi une remédiation de lecture d'en moyenne 5.8 ans. Cette remédiation a pris fin au moins 6 ans avant la passation de l'étude. Aucun des sujets dyslexiques ne présentait un autre trouble des apprentissages ni de déficit d'attention avec hyperactivité. Comme dans l'étude 2, les mauvais lecteurs ne présentaient pas d'histoire personnelle ou familiale de dyslexie ou d'autre trouble des apprentissages. Aucun des mauvais lecteurs n'a en outre suivi de remédiation de lecture avec un orthophoniste. Comme détaillé dans la Table 2, les trois groupes sont appariés sur l'âge chronologique, la durée des études supérieures, ainsi que l'intelligence non verbale. De plus, les sujets dyslexiques et les mauvais lecteurs présentent un niveau de lecture ainsi que des habitudes de lecture similaires. Le niveau de lecture de ces deux groupes est en revanche significativement inférieur à celui des sujets contrôles, qu'il s'agisse des données brutes (i.e., latences de lecture et nombre d'erreurs) ou de l'âge de lecture normé, pour lequel on observe 38 mois d'écart entre les dyslexiques et les contrôles, et 33 mois d'écart entre les mauvais lecteurs et les sujets contrôles. Les habitudes de lecture sont également inférieures chez les sujets dyslexiques et chez les mauvais lecteurs, qui lisent en moyenne 9 livres en moins par an que les sujets contrôles. Enfin, les sujets dyslexiques présentent un score de dénomination d'images et de couleurs inférieur aux deux autres groupes et un score de dénomination de chiffres inférieur au groupe contrôle.

Tableau 3. Caractéristiques des groupes

	Dyslexiques (n = 12)	Mauvais lecteurs (n = 12)	Contrôles (n = 14)	Mauvais lecteurs vs Dyslexiques t(22)	Mauvais lecteurs vs Contrôles t(24)	Dyslexiques vs Contrôles t(24)
Sexe (homme: femme)	5 : 7	5 : 7	6 : 8			
Age (années)	27.7 (± 6.8)	23.3 (± 5.1)	25.5 (± 4.3)	1.79 <i>ns</i>	1.23 <i>ns</i>	-0.98 <i>ns</i>
Durée moyenne des études supérieures	1.6 (± 2.3)	1.6 (± 1.7)	1.8 (± 2)	-0 <i>ns</i>	0.27 <i>ns</i>	-0.98 <i>ns</i>
Matrices de Raven (rang centile)	81.7 (± 11.3)	82.9 (± 19.1)	85.4 (± 13.1)	-0.19 <i>ns</i>	0.38 <i>ns</i>	0.76 <i>ns</i>
<b>Test de lecture de l'Alouette</b>						
Age moyen de lecture normé (mois)	133.3 (± 12.7)	138 (± 8.3)	171 (±0)	-1.08 <i>ns</i>	14.89***	11.18***
Temps moyen (min)	2.3 (± .4)	2.1 (± .2)	1.5 (± .1)	1.6 <i>ns</i>	-8.39***	-7.2***
Nombre d'erreurs moyen	8 (± 2.8)	6 (± 3.1)	2.3 (± 1.9)	1.66 <i>ns</i>	-3.74**	-6.08***
<b>Latences de dénomination (secondes)</b>						
Images	75.3 (±14.8)	63.8 (±7)	61.3 (±9)	2.43*	-0.8 <i>ns</i>	-2.97**
Chiffres	42.8 (±10.1)	39.3 (±7.3)	34.5 (±8.6)	0.99 <i>ns</i>	-1.5 <i>ns</i>	-2.27*
Couleurs	67.8 (±18.4)	55.3 (±10.5)	54.9 (±7.5)	2.03*	-0.13 <i>ns</i>	-2.4*
<b>Habitudes de lecture</b>						
Nombre moyen de livres lus par an	9.2 (±12.4)	8.7 (±9.7)	18.4 (±13.3)	0.1 <i>ns</i>	2.1*	2.4*
<b>Remédiation (années)</b>						
Durée moyenne	5.8 (±2.4)					
Age moyen de début	7.6 (±1.4)					
Age moyen de fin	12.8 (±1.6)					

Note: Différence inter-groupes (test t): *ns*, non significatif, \*  $p \leq .05$ , \*\*  $p \leq .01$ , \*\*\*  $p \leq .001$ .

### Stimuli et procédure

210 mots monosyllabiques de 5 lettres ont été sélectionnés dans la base de données française *Lexique 3* (New et al., 2001). La moitié de ces stimuli présentait une fréquence

lexicale élevée (moyenne 190.7, allant de 46.1 à 732.4) tandis que l'autre moitié présentait une fréquence lexicale faible (moyenne de 6.6, allant de .07 à 15.5). Ces deux groupes d'items différaient uniquement par leur fréquence lexicale ( $F(1, 208)=118.1, p<.001$ ) et étaient appariés sur le nombre de voisins orthographiques et phonologiques ( $F<1$ ). 210 non-mots ont été créés: 70 pseudomots légaux et prononçables; 70 séquences de consonnes, appariées sur la forme visuelle avec la liste de mots (e.g., les stimuli «glace» et «phrcv» contiennent tous deux une lettre ascendante et une lettre descendante à la même position; les stimuli «fruit» et «lnvrb» contiennent deux lettres ascendantes à la même position); et 70 séquences de symboles non familiers. Le détail du matériel sélectionné pour l'étude est fourni dans le Tableau 4.

Tableau 4. Caractéristiques des stimuli

	<i>Stimuli écrits</i>				<i>Symboles</i>
	<i>Mots fréquents</i>	<i>Mots rares</i>	<i>Pseudomots</i>	<i>Consonnes</i>	
<i>Exemple</i>	blanc	flair	blone	fbnrc	§ ð ‡ Ø £
<i>FL</i>	190.7 (46.1-732.4)	6.6 (.07-15.5)			<i>Symboles utilisés dans l'étude</i>
<i>VO</i>	6.4 (0-16)	6.1 (0-14)			¬ ‡ ¢ £ □ * ¥ †
<i>VP</i>	13.8 (2-40)	14.4 (0-34)			§ ¶ Đ Ø Þ ð

Note: LF= Fréquence Lexicale, VO= nombre de Voisins Orthographiques, VP= nombre de Voisins Phonologiques.

Les participants ont réalisé une tâche de décision lexicale basée sur la même procédure que les deux études précédentes, à l'exception du format de présentation qui était toujours horizontal. La tâche comprenait 420 essais divisés en 3 blocs expérimentaux.

## Analyses ERP

Les essais correspondant à de mauvaises réponses ou des réponses dépassant deux écarts-types de la moyenne des TRs de chaque participant ont été exclus des analyses, induisant la réjection de 5.1% des données pour les dyslexiques, 4.6% pour les mauvais lecteurs et 4.4% pour les contrôles. Le calcul des grandes moyennes, réalisé pour chaque condition au sein de chaque groupe, a été basé sur une moyenne de 60.5 essais pour les dyslexiques (65 essais pour les mots, 56 essais pour les non-mots), 65 essais pour les mauvais lecteurs (71 essais pour les mots, 59 essais pour les non-mots) et 61 essais pour les contrôles (65 essais pour les mots, 57 essais pour les pseudomots). L'analyse du composant N170 a été réalisée sur des sites occipito-temporaux (i.e., P7, P8). La fenêtre d'analyse, déterminée à partir de la RMS des 32 électrodes (Figure 23), était comprise entre 135 et 255 ms.

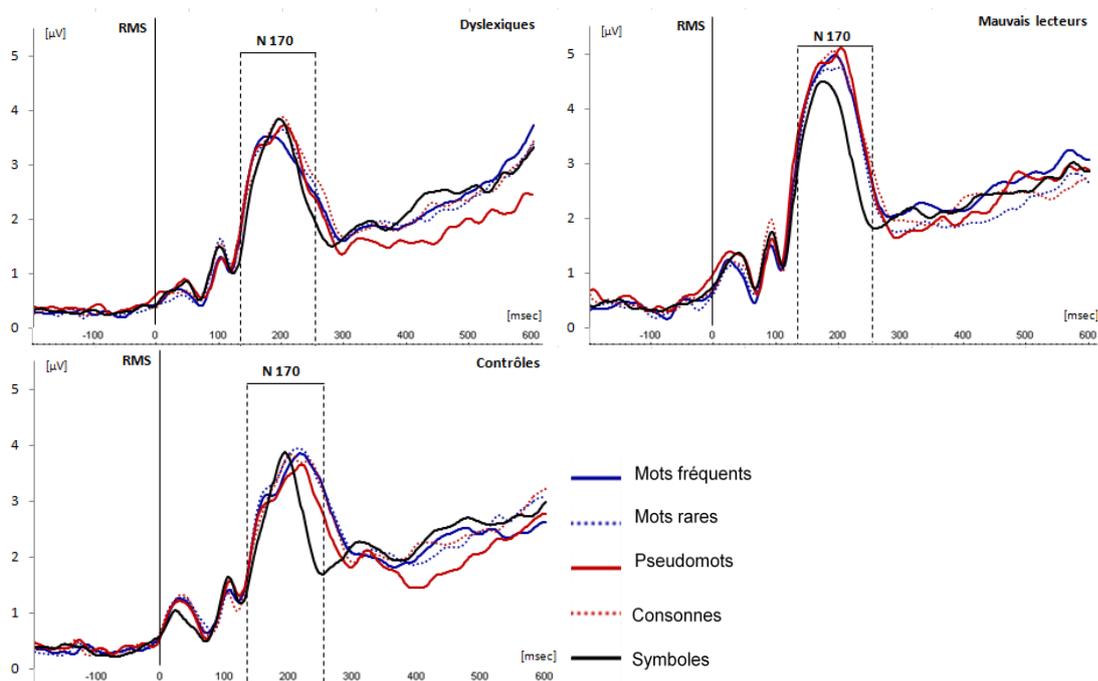


Figure 23. RMS pour chaque groupe et condition.

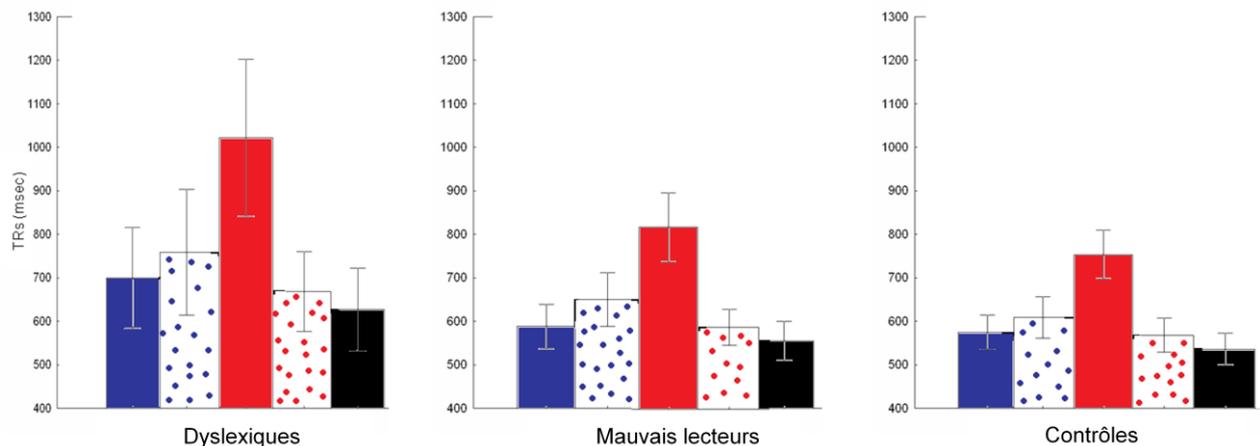
### 3. Résultats

#### Résultats comportementaux

Une ANOVA à mesures répétées a été réalisée sur les TRs et le pourcentage d'erreurs avec un facteur intergroupe (i.e., Groupe: dyslexiques vs. mauvais lecteurs vs. contrôles) et un facteur intragroupe (i.e., Stimulus: mots fréquents vs. mots rares vs. pseudomots vs. séquences de consonnes vs. séquences de symboles).

L'analyse des TRs (Figure 24) révèle un effet significatif du Groupe ( $F(2,35)=4.9$ ,  $p<.01$ ). Des comparaisons planifiées montrent que les dyslexiques (756 ms) répondent en moyenne plus lentement que les mauvais lecteurs (641 ms) et les contrôles (609 ms). L'effet du Stimulus ( $F(4,140)=148.2$ ,  $p<.001$ ) et l'interaction Groupe x Stimulus ( $F(8,140)=5.1$ ,  $p<.001$ ) sont aussi significatifs. Les TRs sont plus élevés pour les pseudomots que pour les autres catégories de stimuli au niveau des trois groupes mais de façon plus marquée chez les dyslexiques.

L'analyse du pourcentage d'erreurs (Figure 24) révèle un effet du Stimulus ( $F(4,140)=32.9$ ,  $p<.001$ ) et une interaction Groupe x Stimulus ( $F(8,140)=5.1$ ,  $p<.001$ ) significatifs. Le taux d'erreur est significativement plus élevé pour les pseudomots que pour les autres catégories de stimuli chez les trois groupes de sujets, mais de façon plus marquée chez les dyslexiques.



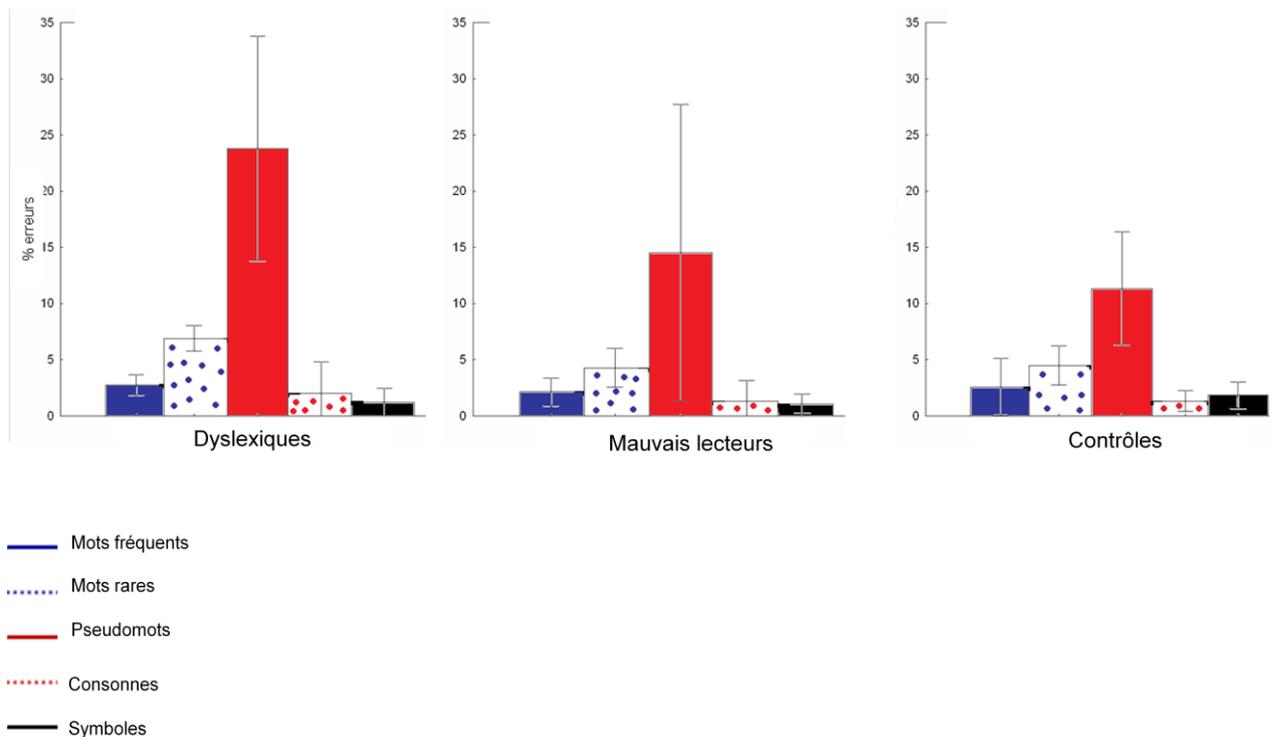


Figure 24 Temps de réaction moyens (TRs) et pourcentage d’erreurs (% erreurs) en fonction du groupe et du type de stimulus.

### Résultats électrophysiologiques

Une ANOVA à mesures répétées a été réalisée sur l’amplitude moyenne du composant N170 avec un facteur intergroupe (i.e., Groupe: dyslexiques vs. mauvais lecteurs vs. contrôles) et deux facteurs intragroupe (i.e., Stimulus: mots fréquents vs. mots rares vs. pseudomots vs. séquences de consonnes vs. séquences de symboles; Hémisphère: gauche vs. droit).

Comme c’est illustré sur les tracés des grandes moyennes (Figure 25), l’amplitude moyenne du composant N170 semble différer entre les stimuli écrits et les séquences de symboles au niveau de l’hémisphère gauche chez les contrôles et les mauvais lecteurs. Cette différence semble en revanche absente chez les dyslexiques.

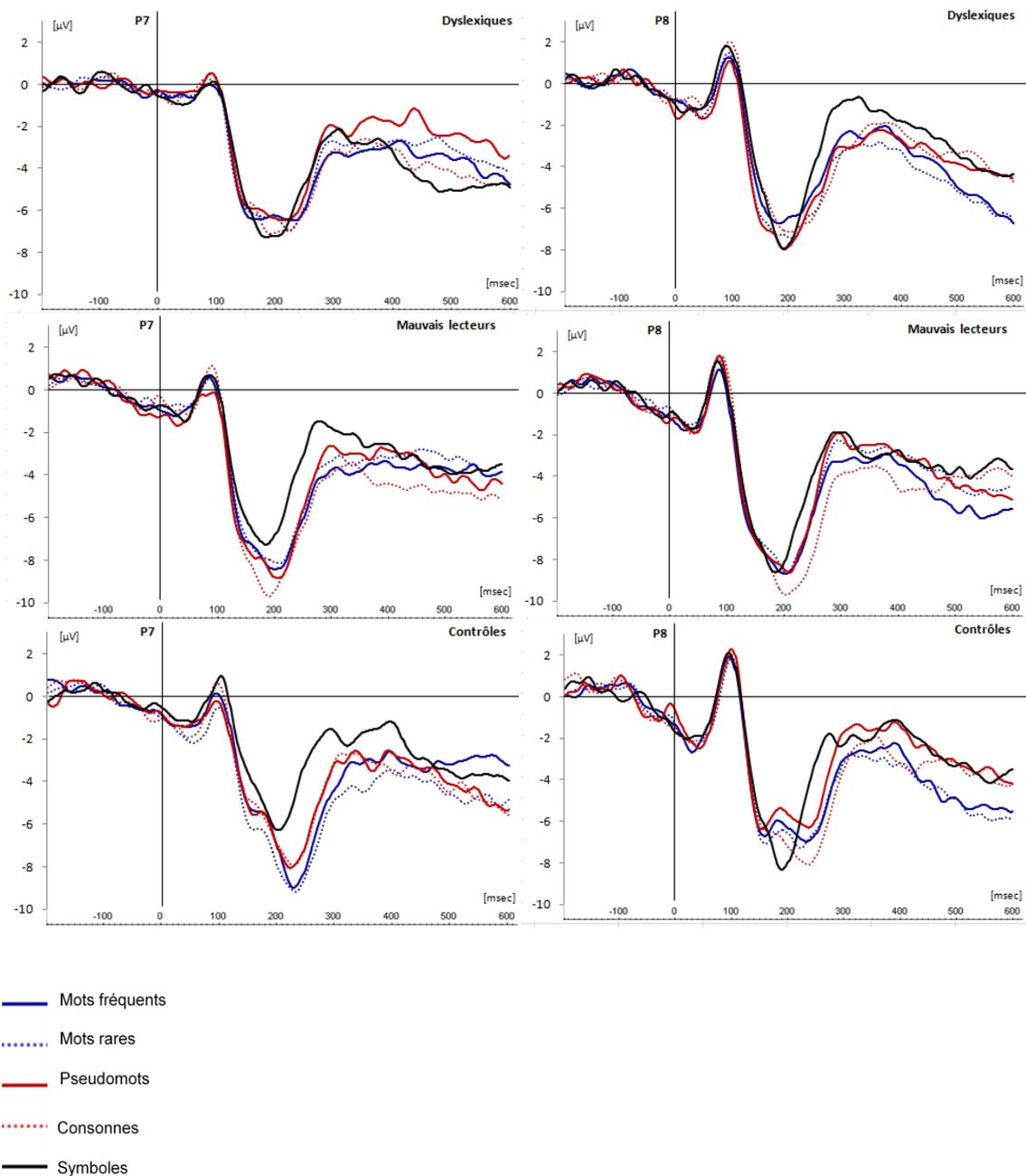


Figure 25. Tracés ERP du composant N170 enregistrés en occipito-temporal (hémisphère gauche: P7; hémisphère droit: P8) pour chaque groupe et type de stimulus.

L'analyse de l'amplitude moyenne du composant N170 met en évidence un effet du Stimulus ( $F(1,35)=6.98$ ,  $p<.001$ ) et une interaction Groupe x Stimulus x Hémisphère ( $F(8,140)=2.4$ ,  $p<.01$ ) significatifs. Les amplitudes du composant N170 sont plus négatives

pour les stimuli écrits relativement aux séquences de symboles dans l'hémisphère gauche chez les contrôles ( $F(1,35)=21.7, p<.001$ ) et les mauvais lecteurs ( $F(1,35)=11, p<.01$ ). Cet effet est en revanche absent chez les dyslexiques ( $F<1$ ). Les comparaisons planifiées au sein de chaque groupe et entre les groupes sont détaillées dans le Tableau 5 et la Figure 26.

Les comparaisons planifiées montrent également chez les contrôles un effet de lexicalité dans l'hémisphère gauche, avec de plus larges négativités pour les mots que pour les pseudomots ( $F(1,35)=7.1, p<.01$ ). Les contrôles présentent aussi un effet de fréquence lexicale dans l'hémisphère gauche, avec de plus larges négativités pour les mots rares que pour les mots fréquents ( $F(1,35)=5.1, p<.05$ ). Ces effets sont en revanche absents chez les mauvais lecteurs et les dyslexiques ( $F<1$ ). Les dyslexiques montrent juste un effet de fréquence lexicale dans l'hémisphère droit ( $F(1,35)=4.3, p<.05$ ), avec de plus larges négativités pour les mots rares par rapport aux mots fréquents.

Tableau 5. Comparaisons planifiées concernant l'interaction Groupe x Stimulus sur l'amplitude moyenne du composant N170.

	Hémisphère gauche			Hémisphère droit		
	Dys	ML	Crtl	Dys	ML	Crtl
S vs stimuli écrits	F<1 <i>ns</i>	F(1,35)=11**	F(1,35)=21.7***	F<1 <i>ns</i>	F(1,35)=2.2 <i>ns</i>	F<1 <i>ns</i>
S vs mots	F<1 <i>ns</i>	F(1,35)=10.1**	F(1,35)=27.3***	F<1 <i>ns</i>	F(1,35)=1.2 <i>ns</i>	F<1 <i>ns</i>
S vs non-mots	F<1 <i>ns</i>	F(1,35)=10.1**	F(1,35)=13.8***	F<1 <i>ns</i>	F=3.2 <sup>a</sup>	F<1 <i>ns</i>
Effet de FL	F<1 <i>ns</i>	F<1 <i>ns</i>	F(1,35)=5.1*	F(1,35)=4.3*	F<1 <i>ns</i>	F<1 <i>ns</i>
Effet de lex.	F<1 <i>ns</i>	F<1 <i>ns</i>	F(1,35)=7.1**	F<1 <i>ns</i>	F(1,35)=1.6 <i>ns</i>	F<1 <i>ns</i>
	Dys vs ML	Dys vs. Crtl	ML vs. Crtl	Dys vs. ML	Dys vs. Crtl	ML vs. Crtl
S vs stimuli écrits	F(1,35)=5.5*	F(1,35)=10.1**	F<1 <i>ns</i>	F<1 <i>ns</i>	F<1 <i>ns</i>	F<1 <i>ns</i>
S vs mots	F(1,35)=4.9*	F(1,35)=12.4***	F=1.5 <i>ns</i>	F<1 <i>ns</i>	F<1 <i>ns</i>	F<1 <i>ns</i>
S vs non-mots	F(1,42)=5.3*	F(1,35)=6.5**	F<1 <i>ns</i>	F<1 <i>ns</i>	F<1 <i>ns</i>	F<1 <i>ns</i>
Effet de FL	F<1 <i>ns</i>	F(1,35)=2.1 <i>ns</i>	F(1,35)=4.1*	F(1,35)=3.9*	F(1,35)=1 <i>ns</i>	F=1.1 <i>ns</i>
Effet de lex.	F=1.7 <i>ns</i>	F=2.8 <i>ns</i>	F(1,35)=5.4*	F<1 <i>ns</i>	F<1 <i>ns</i>	F=1.5 <i>ns</i>

Note: Dys = Dyslexiques, ML = Mauvais Lecteurs, Crtl = Contrôles, S = Symboles, FL = Fréquence

Lexicale, lex = lexicalité, ns not significant, <sup>a</sup> p<.10, \* p < .05, \*\* p < .01, \*\*\* p < .001.

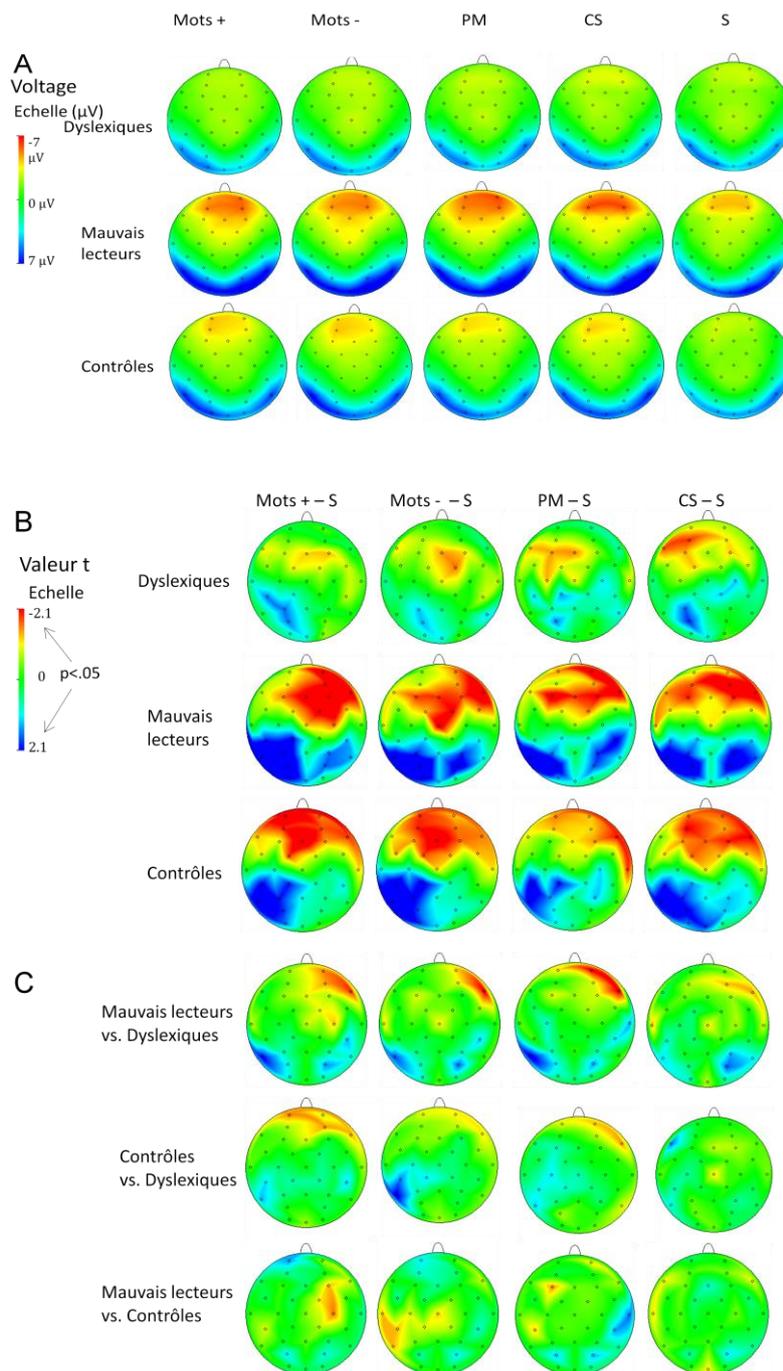


Figure 26. (A) Voltages du composant N170 (135-255 ms) pour chaque catégorie de stimulus (Mots + = Mots fréquents, Mots - = Mots rares, PM = Pseudomots, CS = Consonnes, S = Symboles) au sein de chaque groupe. (B) Les valeurs t pour les différences de voltage entre chaque catégorie de stimuli écrits et les symboles montrent des différences marquées au niveau occipito-temporal gauche chez les contrôles et les mauvais lecteurs. Les dyslexiques montrent en revanche des effets réduits. (C) Les valeurs t pour les contrastes entre les groupes montrent que les dyslexiques diffèrent des contrôles et des mauvais lecteurs tandis que les contrôles et les mauvais lecteurs présentent des résultats similaires.

#### 4. Discussion

Cette expérience est la première à étudier le traitement expert des stimuli écrits à travers la spécialisation du composant N170 chez des adultes dyslexiques. Le premier objectif était de déterminer si le défaut de spécialisation du composant N170 rapporté chez des enfants dyslexiques (Araújo et al., 2012; Maurer et al., 2007) persiste à l'âge adulte. Alors que chez les lecteurs experts l'amplitude du composant N170 est plus négative pour des stimuli écrits que pour des séquences de symboles, cette spécialisation est absente chez les sujets dyslexiques. Dans ce groupe, les amplitudes du composant N170 sont en effet similaires pour les stimuli écrits relativement aux séquences de symboles. Il est important de remarquer que l'absence de spécialisation du composant N170 est présente pour l'ensemble des stimuli écrits, qu'il s'agisse de stimuli familiers (i.e., des mots fréquents et des mots rares) ou non familiers (i.e., des pseudomots et des séquences de consonnes). L'analyse similaire des stimuli verbaux et non-verbaux observée chez les lecteurs dyslexiques suggère une absence de traitement expert de l'écrit chez ces sujets. Ce résultat est cohérent avec les anomalies au niveau de l'activité du gyrus fusiforme gauche rapportées chez des adultes dyslexiques en MEG (Helenius et al., 1999; Salmelin et al., 1996) et en IRMf (Paulesu et al., 2001). L'absence d'expertise pour le traitement de l'écrit pourrait donc être un déficit persistant chez les lecteurs dyslexiques, qui ne se limiterait pas à la phase initiale d'acquisition de la lecture, comme cela a été suggéré (Maurer et al., 2011). Nos résultats ne confirment pas l'hypothèse d'un retard dans la mise en place d'un traitement expert de l'écrit chez les lecteurs dyslexiques. Toutefois, notre étude diffère sur plusieurs aspects relativement à l'étude de Maurer et al. (2011), qui a montré une spécialisation de la N170 chez des enfants dyslexiques de 11.5 ans. Tout d'abord, comme dans les travaux d'Helenius et al. (1999), notre groupe de sujets dyslexiques présente de sévères déficits de lecture (i.e., au moins deux écarts-types sous

la moyenne des sujets contrôles) alors que dans Maurer et al. (2011), les enfants dyslexiques présentaient des déficits moins sévères (i.e., dixième percentile, correspondant à 1.29 écarts types sous la moyenne des sujets contrôles). Il est donc possible que pour une sous-catégorie de lecteurs dyslexiques, caractérisés par des déficits de lecture moins sévères, la mise en place d'un traitement expert des stimuli écrits soit juste retardée. Une autre différence entre notre étude et celle de Maurer et al. (2011) concerne la consistance orthographique. Le français a une orthographe opaque dans laquelle un phonème peut correspondre à différents graphèmes. L'allemand a en revanche une orthographe transparente dans laquelle les relations graphèmes-phonèmes sont univoques. Cette différence de consistance orthographique pourrait affecter la spécialisation de la N170, qui serait influencée par l'apprentissage des relations lettres-sons (i.e., théorie du mapping phonologique; Maurer & McCandliss, 2007; McCandliss & Noble, 2003). Il est donc possible que l'exposition à une orthographe consistante représente une condition optimale pour l'émergence d'un traitement expert des stimuli écrits chez les sujets dyslexiques.

En définitive, nos résultats montrent un déficit d'expertise pour le traitement de l'écrit chez des adultes dyslexiques. Dans notre étude, nous avons comparé des sujets dyslexiques avec deux groupes de sujets contrôles: des lecteurs experts appariés sur l'âge chronologique ainsi que des mauvais lecteurs appariés sur le niveau de lecture. De façon surprenante, en dépit de leurs déficits de lecture observés au niveau comportemental, les mauvais lecteurs présentent une spécialisation du composant N170 pour le traitement des stimuli écrits. Comme chez les lecteurs experts, de plus larges négativités du composant N170 pour les stimuli écrits que pour les séquences de symboles sont en effet observables chez les mauvais lecteurs. Ce résultat montre que chez les adultes, la spécialisation du composant N170, associée traditionnellement au traitement expert des stimuli écrits, n'est pas directement liée au niveau de lecture. Une absence de spécialisation de la N170 ne traduirait donc pas la

présence d'un faible niveau de lecture mais serait le signe d'une spécialisation atypique des structures occipito-temporales gauches propre à la dyslexie. Chez les lecteurs dyslexiques, le traitement des stimuli visuels ne se spécialiserait pas en fonction de leur caractère langagier. Le défaut de spécialisation du composant N170 peut être considéré comme un corrélat électrophysiologique spécifiquement relié à la dyslexie. A défaut de pouvoir associer la spécialisation de la N170 au niveau de lecture, nos résultats apportent un argument supplémentaire en faveur de la théorie du mapping phonologique. Le déficit de spécialisation de la N170 est en effet limité à notre seul groupe de sujet caractérisé par des déficits phonologiques. Nos sujets dyslexiques sont en effet les seuls à présenter des déficits marqués de dénomination et de traitement des pseudomots. La théorie du mapping phonologique établit justement un lien entre les habiletés phonologiques et la spécialisation graduelle du gyrus fusiforme gauche (Maurer & McCandliss, 2007; McCandliss & Noble, 2003). Cette théorie est soutenue par des corrélations établies entre les habiletés de décodage phonologique et le degré d'activation du cortex temporal inférieur gauche (Shaywitz et al., 2002). Deux études d'ERP récentes soutiennent également un lien entre l'acquisition des associations graphèmes-phonèmes et la spécialisation du composant N170 chez des prélecteurs (Brem et al., 2010) et des adultes (Yoncheva et al., 2010). Sur cette base, nous pouvons émettre l'hypothèse que les troubles phonologiques des sujets dyslexiques de notre étude aient pu compromettre l'émergence d'une expertise pour le traitement de l'écrit.

Enfin, il est important de remarquer que contrairement à certains travaux rattachant le composant N170 à une fonction exclusivement pré-lexicale (Bentin et al., 1999; Simon et al., 2004), nos résultats mettent en évidence une sensibilité du composant N170 aux attributs lexicaux. Les lecteurs experts montrent en effet des effets de lexicalité et de fréquence lexicale sur l'amplitude du composant N170. Certains travaux ont également montré des effets de lexicalité (Dujardin et al., 2011; Hauk, Coutout, Holden, & Chen, 2012; Kim &

Straková, 2012; Maurer et al., 2005b) et de fréquence lexicale (Hauk & Pulvermüller, 2004; Sereno, Rayner, & Posner, 1998; Sereno & Rayner, 2003) sur l'amplitude du composant N170. Bien que le sens de ces effets varie d'une étude à l'autre, la présence d'effets lexicaux à des latences aussi précoces suggère un accès particulièrement rapide et automatique au lexique. Notre étude montre en outre que cet accès rapide au lexique n'est présent que chez les lecteurs experts, la sensibilité du composant N170 aux effets de lexicalité et de fréquence lexicale étant absente chez les sujets dyslexiques et chez les mauvais lecteurs. Dans l'ensemble, nos résultats suggèrent que l'absence de spécialisation du composant N170 pour l'écrit traduit une spécialisation atypique des structures cérébrales propre à la dyslexie tandis que la sensibilité du composant N170 aux attributs lexicaux traduit un accès au lexique rapide qui pourrait nécessiter l'acquisition d'une certaine expertise en lecture. Il est intéressant de remarquer que les lecteurs dyslexiques présentent un effet de fréquence lexicale dans l'hémisphère droit, en accord avec les sur-activations observées dans l'hémisphère droit dans cette population (Shaywitz et al., 1998). Un mécanisme de compensation a pu se mettre en place spécifiquement chez les lecteurs dyslexiques, ce résultat n'étant pas observé dans le groupe de mauvais lecteurs.

## **5. Conclusion**

Cette étude met en évidence un défaut d'expertise pour le traitement des stimuli écrits chez des adultes dyslexiques. Ce déficit est spécifique à la dyslexie, entrant donc en faveur avec l'idée que la dyslexie pourrait résulter d'anomalies dans la spécialisation des aires occipito-temporales gauches qui sous-tendent le traitement expert des stimuli écrits. De plus et de façon concordante avec l'étude 2, nos résultats montrent certaines spécificités (i.e., une absence d'effets de lexicalité et de fréquence lexicale dans l'hémisphère gauche) dans la

spécialisation du composant N170 propres aux individus présentant un faible niveau de lecture.

### **Partie 3. L'attention visuo-spatiale dans le traitement des stimuli visuels langagiers et non langagiers**

Les expériences 1, 2 et 3 de ce projet de recherche mettent en évidence des altérations au niveau de la voie ventrale chez les sujets dyslexiques. Lors du traitement en parallèle (i.e., format horizontal des études 1 et 2 et étude 3), les sujets dyslexiques montrent un déficit de l'analyse rapide des mots familiers. Dans une situation de traitement sériel (i.e., format vertical des études 1 et 2), les lecteurs dyslexiques manifestent une altération du traitement rapide des lettres/groupes de lettres qui forment les stimuli écrits. Ces troubles pourraient en partie être liés à un défaut du traitement expert de l'écrit, comme suggéré par les résultats de l'étude 3, qui montrent une absence de spécialisation du composant N170 pour l'écrit chez les sujets dyslexiques. Nous avons également fait l'hypothèse que les altérations observées au niveau de la voie ventrale pourraient être liées à des déficits attentionnels. Les données des expériences 1 et 2 au niveau de la voie dorsale pour le format vertical soutiennent cette hypothèse. Les dyslexiques présentent en effet une durée prolongée du composant N100, pouvant être interprétée comme un ralentissement du déplacement attentionnel lors du décodage sériel chez le sujet dyslexique. Le ralentissement du déplacement de l'attention est un des troubles attentionnels qui a été mis en évidence dans la dyslexie au niveau comportemental (Dispaldro et al., 2012; Facoetti et al., 2008; Hari & Renvall, 2001) et électrophysiologique (Wimmer et al., 2002). Il est en outre admis que le déplacement rapide de l'attention est un mécanisme fortement sollicité lors du décodage sériel (Perry et al., 2007).

Les études 1 et 2 nous ont uniquement permis d'étudier l'orientation précoce de l'attention. L'orientation de l'attention vers la cible à traiter mais aussi l'inhibition des informations adjacentes sont impliquées lors de l'analyse sérielle des stimuli écrits (Laberge & Brown, 1989). Dans cette situation, l'attention se focaliserait sur les unités sublexicales

connues des séquences de lettres, telles que des lettres ou des groupes de lettres. L'implication de l'attention lors du décodage sériel pour la segmentation des séquences de lettres en unités sublexicales comme des lettres, des graphèmes (Coltheart et al., 2001; Perry et al., 2007) ou encore des syllabes (Ans et al., 1998) est par ailleurs soutenue par de nombreux modèles de reconnaissance visuelle des mots. L'identification des unités sublexicales des stimuli écrits jouerait également un rôle majeur lors du traitement en parallèle des mots familiers. Les premières étapes de la reconnaissance visuelle de mots familiers consistent en effet en une activation des lettres ou des groupes de lettres qui les composent. L'identification de ces unités sublexicales a un effet sur l'accès au lexique. Des travaux comportementaux ont montré une perception automatique de certaines unités sublexicales telles que les graphèmes (Rey, Ziegler, & Jacobs, 2000) ou les syllabes (Doignon & Zagar, 2005) lors du traitement des mots. Des études ont également mis en évidence un effet de l'activation des groupes de lettres fréquemment associés dans le langage (Conrad et al., 2009) ou des unités syllabiques (Carreiras et al., 1993; Conrad & Jacobs, 2004; Mahé et al., 2013) sur la vitesse d'accès au lexique. Des études d'ERP ont enfin montré une activation précoce des lettres (Madec, Rey, Dufau, Klein, & Grainger, 2012) ainsi que des unités syllabiques (Barber et al., 2004; Hutzler et al., 2004) lors du traitement des stimuli écrits. En ce qui concerne la syllabe, il a également été montré que l'activation précoce de cette unité a un effet sur les étapes de traitement lexical (Barber et al., 2004; Hutzler et al., 2004). Cet impact des unités sublexicales sur l'accès au lexique implique que les lecteurs soient capables de rapidement les sélectionner lors du traitement des stimuli écrits.

En résumé, l'orientation de l'attention et l'inhibition sont deux processus attentionnels sollicités lors du traitement des stimuli écrits, qu'il s'agisse d'une situation d'analyse en parallèle ou d'analyse sérielle. L'objectif de la dernière partie de ce projet a été d'étudier à la fois l'orientation de l'attention et l'inhibition chez des adultes dyslexiques. Une altération de

l'un ou de ces deux processus pourrait en effet expliquer en partie les déficits de traitement des stimuli écrits observés chez les sujets dyslexiques au niveau de la voie ventrale. Une première étude comportementale a consisté à évaluer la sélection d'une lettre cible lors d'analyses en parallèle ou sérielle de séquences de lettres chez le lecteur expert et dyslexique. Une seconde étude d'ERP, menée avec des stimuli non langagiers, nous a permis de différencier l'orientation de l'attention et l'inhibition chez des lecteurs experts, des mauvais lecteurs et des lecteurs dyslexiques.

## **I. Etude 4. La sélection attentionnelle**

### **1. Introduction**

L'objectif de cette première étude a été d'étudier le processus de sélection d'une cible chez des adultes dyslexiques. Ce processus a été étudié à partir d'une tâche de détection d'une lettre cible dans un mot. La manipulation de la familiarité du format de présentation nous a permis de placer nos sujets dans une condition de traitement en parallèle des lettres (i.e., format familier horizontal) et dans une situation de traitement sériel des lettres (i.e., format inhabituel vertical). La stratégie de recherche employée par les sujets (i.e., traitement en parallèle vs. traitement sériel) a été évaluée en mesurant les effets de longueur de mots et de position de la lettre cible à détecter. Si les individus parviennent à mettre en place une stratégie de recherche en parallèle, ils devraient être peu voire pas affectés par le nombre de lettres de la séquence ou par le fait que la lettre à détecter soit située en début ou en fin de séquence. Pour le format vertical en revanche, les lecteurs experts devraient appliquer une stratégie de recherche sérielle, et être donc particulièrement affectés par ces facteurs. On s'attend donc à retrouver des effets de longueur des mots et de position de la lettre cible uniquement pour le format vertical chez les lecteurs experts. Chez les sujets dyslexiques, il a été montré que la stratégie de traitement en parallèle ne se met pas en place avec l'apprentissage de la lecture (Dürwächter et al., 2010; Zoccolotti et al., 2005). De plus, les résultats de nos études 1, 2 et 3 suggèrent une altération de l'accès rapide au lexique chez les sujets dyslexiques. Nous faisons donc l'hypothèse que ces derniers devraient appliquer une stratégie de recherche sérielle même pour le format horizontal, ce qui devrait se traduire par un effet de longueur de mots et un effet de position de la lettre cible dans ce groupe. Concernant le traitement sériel des stimuli écrit, des déficits marqués ont été rapportés chez les lecteurs dyslexiques (Rack et al., 1992; Sprenger-Charolles et al., 2000; Sprenger-

Charolles et al., 2009). De plus, les études 1 et 2 montrent une altération de l'analyse sérielle des stimuli écrits au niveau des voies ventrale et dorsale. On s'attend donc à observer un ralentissement des sujets dyslexiques pour le format vertical ainsi que des effets de longueur des mots et de position de la lettre cible beaucoup plus marqués pour le format vertical chez les sujets dyslexiques que chez les lecteurs experts.

## 2. Méthode

### Participants

34 adultes français ont participé à l'étude: 14 dyslexiques (dont 1 gaucher, moyenne d'âge de 22 ans,  $\pm$  3.9 ans) et 20 contrôles (dont 3 gauchers, moyenne d'âge de 24.5 ans,  $\pm$  4.8 ans). Les sujets dyslexiques ont tous été diagnostiqués par un orthophoniste et ne présentaient pas d'autre trouble des apprentissages. Comme c'est détaillé dans le Tableau 6, les deux groupes sont appariés sur l'âge chronologique. Les performances des sujets dyslexiques sont altérées par rapport aux sujets contrôles dans le test de lecture.

Tableau 6. Caractéristiques des participants

	Contrôles (n = 20)	Dyslexiques (n = 14)	t (26)
Age (années)	24.5 ( $\pm$ 4.8)	22 ( $\pm$ 3.9)	-1.53 <i>ns</i>
Test de lecture de l'Alouette			
<i>Age moyen de lecture normé (mois)</i>	171 ( $\pm$ 0)	126.1 ( $\pm$ 19.2)	8.78***
<i>Temps moyen (minutes)</i>	1.3 ( $\pm$ .1)	2.4 ( $\pm$ .6)	-7.37***

Différence inter-groupes (test t): *ns*, non significatif, \*  $p \leq .05$ , \*\*\*  $p \leq .001$ .

## Stimuli et procédure

360 mots monosyllabiques ou bisyllabiques ont été sélectionnés dans la base de données française *Lexique 3* (New et al., 2001): 120 mots de 4 lettres, 120 mots de 6 lettres et 120 mots de 8 lettres. La fréquence lexicale moyenne des stimuli était de 51.3 occurrences par million (allant de 0.07 à 741.8). 180 mots contenaient la lettre cible et 180 mots ne la contenaient pas. La fréquence lexicale ne différait pas entre les items contenant la lettre cible et ceux qui ne la contenaient pas ( $F < 1$ ), ni en fonction de la longueur des mots ( $F(2,354) = 1.31, p > .1$ ). Pour la moitié des mots contenant la lettre cible, cette lettre était positionnée en début de mot (i.e., position 1 ou 2 pour les items de 4 lettres, position 1 à 3 pour les items de 6 lettres, position 1 à 4 pour les items de 8 lettres). Pour l'autre moitié des stimuli, la lettre cible était située en fin de mot (i.e., position 3 ou 4 pour les items de 4 lettres, position 4 à 6 pour les items de 6 lettres, position 5, 6, ou 8 pour les items de 8 lettres). Une ANOVA réalisée sur le matériel montre une interaction entre la longueur du mot et la position de la lettre cible ( $F(2,174) = 28.1, p < .001$ ; Figure 27). La position de la lettre cible ne varie pas en fonction du nombre de lettres lorsque la cible est placée en début de mot. À l'inverse, lorsque la lettre cible est placée en fin de mot, sa position augmente linéairement avec le nombre de lettres.

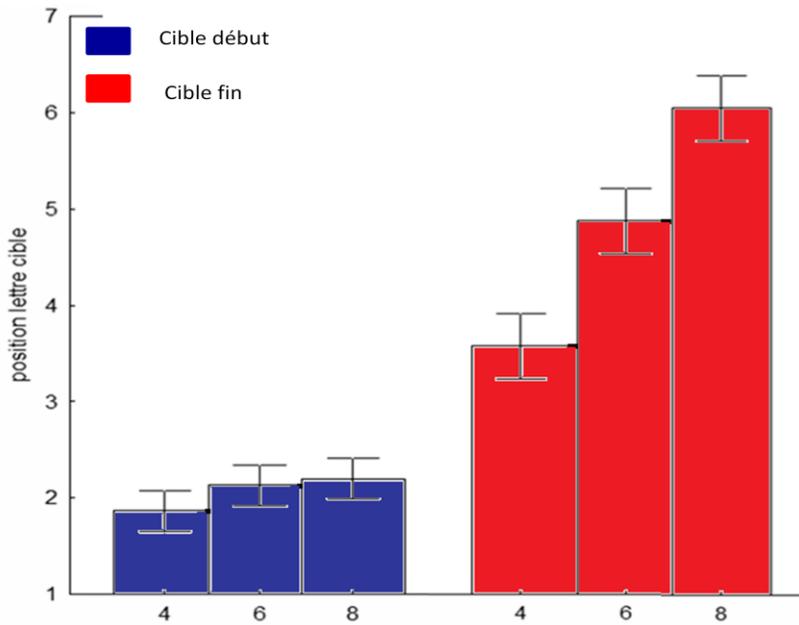


Figure 27. Représentation de l'interaction Longueur x Position. Lorsque la lettre cible est située en début de mot, sa position est similaire entre les items de 4, 6 et 8 lettres. En revanche, lorsque la lettre cible est située en fin de mot, sa position augmente linéairement avec le nombre de lettres des mots.

Les participants ont réalisé une tâche de détection d'une lettre cible. Au début de chaque essai, les sujets avaient pour instruction de fixer une croix blanche présentée au milieu d'un écran noir pendant 400 ms. La croix de fixation était ensuite remplacée par un écran noir pendant 120 ms, suivie du stimulus présenté jusqu'à la réponse du sujet. Les stimuli, représentant 2.86° d'angle visuel, apparaissaient en lettres minuscules dans la police "Calibri" (taille 28). La moitié des stimuli était présentée horizontalement, l'autre moitié verticalement. Deux listes ont été réalisées de façon à ce que tous les stimuli soient présentés dans les deux formats et que chaque sujet ne voit qu'une seule fois chaque item. Une analyse montre une absence d'effet de la liste sur les latences de réponses des sujets ( $t(32)=.27, p>.1$ ), indiquant que les deux listes ont représenté la même difficulté. Les participants avaient pour consigne d'indiquer si le mot affiché à l'écran contenait une lettre cible, indiquée oralement en début de bloc. Les sujets devaient appuyer sur la touche 'Ctrl' située du côté de leur main dominante si

le stimulus présenté contenait la lettre cible. A l'inverse, les sujets devaient appuyer sur la touche 'Ctrl' située du côté de leur main non dominante si le stimulus ne contenait pas la lettre cible. Les participants avaient pour instruction de répondre le plus rapidement et le plus précisément possible sans tenir compte du format visuel de présentation des stimuli. Les réponses des participants étaient suivies d'un intervalle inter-essais de 1400 ms. La tâche était divisée en 4 blocs expérimentaux, 1 bloc pour chaque lettre cible (i.e., la lettre a, la lettre e, la lettre i et la lettre o). Une session d'entraînement de 10 items était réalisée au début de chaque bloc, afin d'éviter une confusion possible entre les différentes lettres cibles.

### **3. Résultats**

Une ANOVA à mesures répétées a été réalisée sur les TRs et le pourcentage d'erreurs avec un facteur intergroupe (i.e., Groupe: dyslexiques vs. contrôles) et trois facteurs intragroupes (i.e., Format: horizontal vs. vertical; Longueur: 4 lettres vs. 6 lettres vs. 8 lettres; Position: début vs. fin).

L'analyse des TRs (Figure 28) montre un effet simple du groupe ( $F(1,32)=13.3$ ,  $p<.001$ ), avec des latences de réponses ralenties chez les dyslexiques (784 ms) par rapport aux contrôles (604 ms). L'interaction Groupe x Format x Longueur x Position n'est pas significative ( $F<1$ ). En revanche, les résultats révèlent que les effets simples du format et de la longueur varient en fonction du groupe. L'interaction Groupe x Format ( $F(1,32)=3.9$ ,  $p<.05$ ) montre que les latences de réponses sont ralenties pour le format vertical par rapport au format horizontal, et ce de façon plus marquée chez les dyslexiques (Format horizontal: 719 ms; Format vertical: 850 ms) que chez les contrôles (Format horizontal: 557 ms; Format vertical: 651 ms). L'interaction Groupe x Longueur ( $F(2,64)=5$ ,  $p<.01$ ) met en évidence que l'effet de longueur des mots est plus marqué chez les dyslexiques que chez les contrôles pour la comparaison des items de 4 lettres (Dyslexiques: 714 ms; Contrôles: 563 ms) et de 6 lettres

(Dyslexiques: 786 ms; Contrôles: 597 ms) et des items de 4 lettres et de 8 lettres (Dyslexiques: 854 ms; Contrôles: 651 ms). Seul l'effet de la position de la lettre cible ne varie pas en fonction du groupe ( $F < 1$ ).

Les analyses montrent également que les effets de longueur et de position varient en fonction du format dans les deux groupes de sujets. L'interaction Format x Longueur ( $F(2,64)=37.6$ ,  $p < .001$ ) met en évidence une modification de l'effet de longueur des mots en fonction du format. L'effet de longueur des mots est plus marqué pour le format vertical (4 lettres: 662 ms; 6 lettres: 754 ms; 8 lettres: 836 ms) que pour le format horizontal (4 lettres: 615 ms; 6 lettres: 629 ms; 8 lettres: 668 ms). De plus, lorsque l'on compare les items de 4 lettres et de 6 lettres, on observe uniquement un effet de longueur pour le format vertical. L'interaction Format x Position ( $F(1,32)=7.7$ ,  $p < .01$ ) indique que l'effet de position est plus marqué dans le format vertical (Cible début de mot: 729 ms; Cible fin de mot: 772 ms) que dans le format horizontal (Cible début de mot: 632 ms; Cible fin de mot: 644 ms). Enfin, l'interaction Longueur x Position est significative ( $F(2,64)=4.5$ ,  $p < .01$ ) et indique que l'effet de position est présent pour les items de 4 lettres (Cible début de mot: 618 ms; Cible fin de mot: 659 ms) et de 6 lettres (Cible début de mot: 677 ms; Cible fin de mot: 706 ms) et absent pour les items de 8 lettres (Cible début de mot: 746 ms; Cible fin de mot: 758 ms).

L'analyse du pourcentage d'erreurs montre un effet simple de Longueur ( $F(2,64)=12.5$ ,  $p < .001$ ), avec un taux d'erreurs plus important pour les items de 8 lettres (Contrôles: 6.5 %; Dyslexiques: 7.4%) que pour les items de 4 lettres (Contrôles: 3.6%; Dyslexiques: 3.9%) et de 6 lettres (Contrôles: 3.9%; Dyslexiques: 3.8%). L'interaction Longueur x Position ( $F(2,64)=4.5$ ,  $p < .05$ ) est aussi significative et indique un effet de position limité aux items de 8 lettres, avec un taux d'erreur plus élevé lorsque la lettre cible se situe en début de mot (Contrôles: 8%; Dyslexiques: 9.6%) qu'en fin de mot (Contrôles: 5%; Dyslexiques: 5.3%).

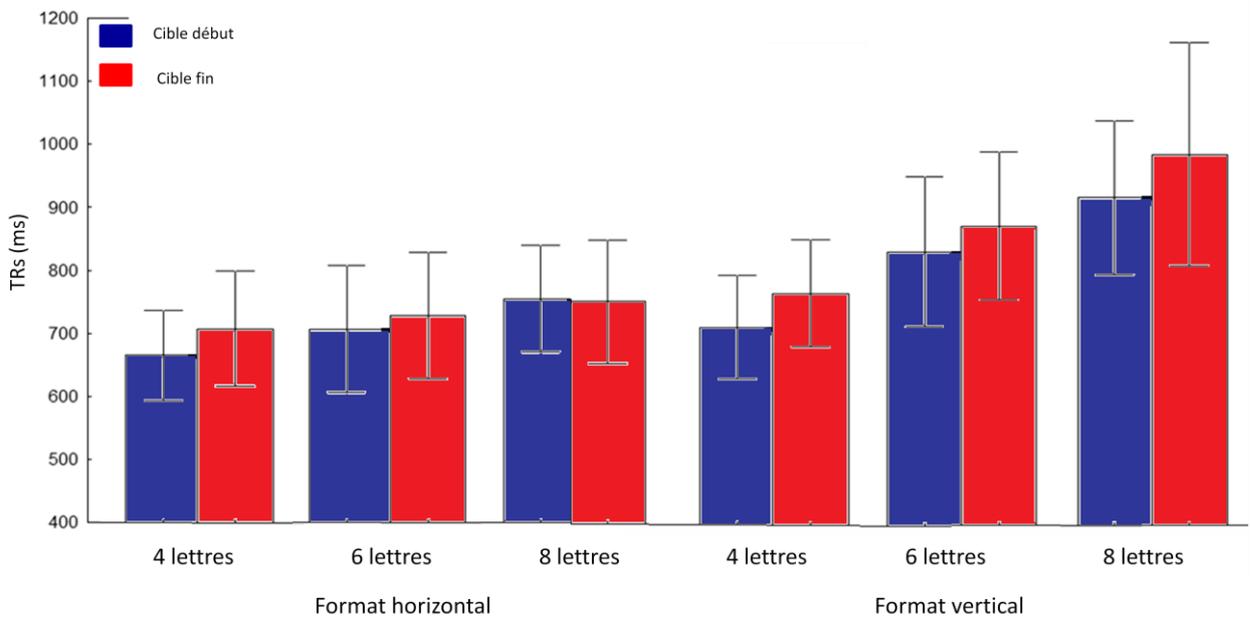
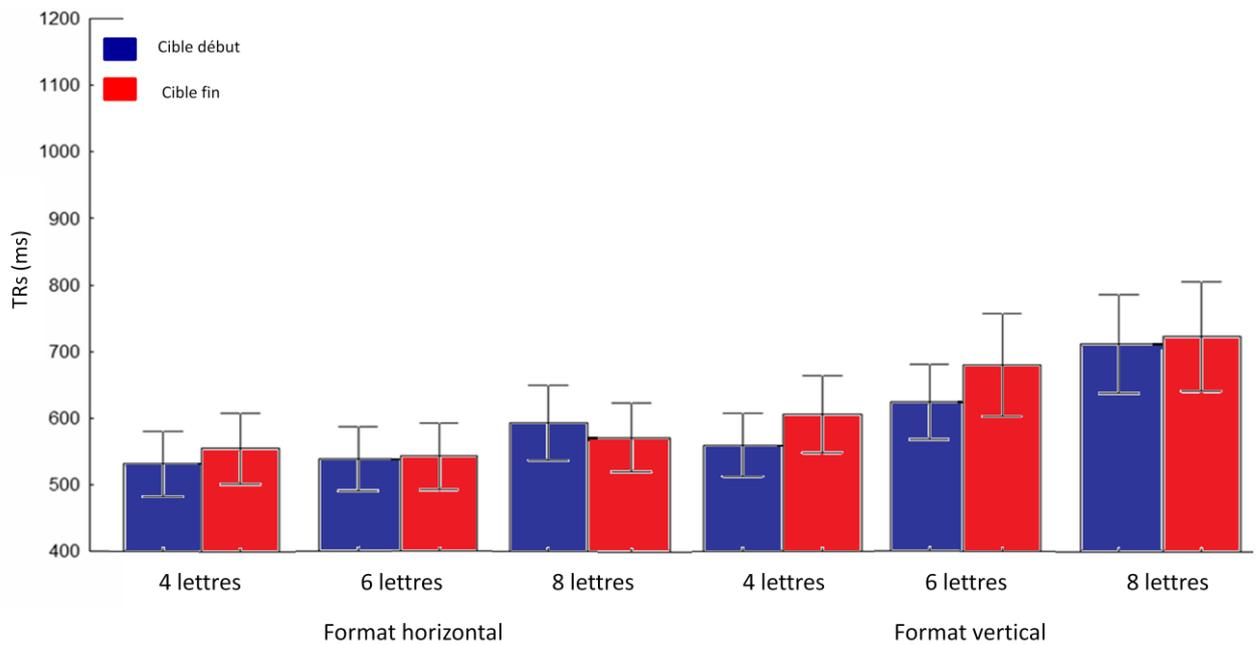


Figure 28. Temps de réaction moyens (TRs) en fonction du groupe (contrôles en haut et dyslexiques en bas), du format de présentation, du nombre de lettres des mots et de la position de la lettre cible.

#### 4. Discussion

Cette expérience avait pour objectif d'étudier la sélection d'une lettre cible dans une situation de traitement en parallèle et de traitement sériel chez des lecteurs dyslexiques. Nous

abordons dans un premier temps les processus communs à nos deux groupes de sujets avant de détailler les spécificités de la dyslexie.

### Processus communs entre les lecteurs experts et les lecteurs dyslexiques

Dans les deux groupes, le traitement mis en place semble être affecté par la familiarité du contexte de présentation des mots. Tout d'abord, l'effet de longueur des mots est bien plus marqué pour le format vertical que pour le format horizontal. L'effet de longueur des mots est même limité au format vertical pour la comparaison des mots de 4 lettres et des mots de 6 lettres, comme cela a déjà été décrit dans d'autres travaux (Cohen et al., 2008). Dans notre étude, l'effet de position de la lettre cible est également affecté par le format de présentation des mots. L'effet de position est ainsi bien plus marqué pour le format vertical que pour le format horizontal. L'ensemble de ces résultats traduit la mise en place de processus de recherche différents en fonction de la familiarité du format de présentation des mots. Dans un format familier, l'analyse simultanée de l'ensemble des lettres de la séquence rendrait les sujets peu sensibles au nombre de lettres des mots et à la position de la lettre cible dans la séquence. En revanche, lorsque le contexte de présentation est inhabituel, un traitement sériel se mettrait en place. Dans cette condition, la sélection de la lettre cible prendrait plus de temps lorsque le nombre de lettres présentées augmente et lorsque la lettre cible est située en fin de séquence pour les items de 4 et de 6 lettres. Notre étude montre que le passage d'un traitement en parallèle à un traitement sériel en fonction du format de présentation est similaire entre nos deux groupes de sujets.

Nos résultats mettent également en évidence chez les deux groupes de participants une modulation de l'effet de position de la lettre cible en fonction de la longueur des mots. Les latences montrent étonnamment un effet de position uniquement pour les items de 4 et de 6 lettres tandis que l'effet de position est absent pour les items de 8 lettres. De plus,

contrairement à ce que l'on pourrait attendre, le taux d'erreur est plus élevé pour les items de 8 lettres lorsque la lettre cible est en début de mot qu'en fin de mot. Ces effets peuvent être expliqués par notre design expérimental. Dans notre tâche, les mots apparaissaient au centre de l'écran. Il est donc possible que pour les items de 8 lettres, les sujets aient commencé leur recherche du point central vers la droite (pour les items horizontaux) ou vers le bas (pour les items verticaux). Les latences de réponses des sujets ne seraient donc pas affectées lorsque la position de la lettre cible se situe en fin de mot pour les items de 8 lettres. Ils pourraient en revanche commettre davantage d'erreurs d'omissions lorsque la lettre cible se situe en début de mot.

En définitive, les sujets dyslexiques présentent certaines similarités avec les lecteurs experts lorsqu'ils doivent effectuer une tâche de sélection d'une lettre cible.

### Les spécificités des dyslexiques

Les sujets dyslexiques présentent certaines spécificités par rapport aux lecteurs experts. Tout d'abord, l'effet global du groupe sur les latences de détection traduit une difficulté majeure des sujets dyslexiques à effectuer une tâche de sélection attentionnelle par rapport aux sujets contrôles. Par ailleurs, les sujets dyslexiques semblent plus affectés que les sujets contrôles par certains facteurs: la familiarité du format de présentation et le nombre de lettres des mots. Les sujets dyslexiques sont en effet significativement plus ralentis que les sujets contrôles lorsqu'ils doivent sélectionner une lettre cible dans un contexte non familier par rapport à un contexte familier. Il est possible que la sélection d'une cible représente une tâche particulièrement difficile pour les lecteurs dyslexiques, et ce d'autant plus pour des contextes nouveaux. Enfin, les sujets dyslexiques sont également plus affectés que les sujets contrôles par l'augmentation du nombre de lettres des mots, qui traduit une augmentation du nombre de lettres distractrices présentées avec la lettre cible. Des travaux ont montré que des

enfants (Vidyasagar and Pammer, 1999) et des adultes dyslexiques (Bucholz and McKone, 2004) sont particulièrement affectés par l'augmentation du nombre de distracteurs dans des tâches de détection de cibles.

L'ensemble de ces résultats suggère que la sélection d'une lettre cible dans une séquence de lettres est une tâche particulièrement difficile pour les lecteurs dyslexiques, surtout lorsque le contexte est inhabituel et lorsque le nombre de lettres à traiter augmente. Les mécanismes déficitaires sous-jacents pourraient concerner différentes opérations cognitives. Les dyslexiques pourraient avoir des difficultés d'orientation attentionnelle vers la cible à traiter, de sorte que le traitement de la cible ne serait pas facilité par rapport au traitement des autres lettres présentées. Il est également possible que les lecteurs dyslexiques aient des difficultés à inhiber les lettres adjacentes à la lettre cible, que l'on peut considérer comme des distracteurs. Notre étude comportementale ne permet pas d'évaluer avec précision laquelle (lesquelles) de ces deux étapes est (sont) déficitaire(s) chez les lecteurs dyslexiques. L'objectif de l'étude 5 est justement d'étudier l'orientation attentionnelle ainsi que l'inhibition chez des adultes dyslexiques afin de déterminer avec précision quelles sont les étapes altérées et préservées.

## II. Etude 5. L'orientation attentionnelle et l'inhibition

### 1. Introduction

L'objectif de cette dernière expérience a été d'étudier l'orientation attentionnelle ainsi que l'inhibition chez des adultes dyslexiques avec du matériel non langagier. Une façon d'étudier simultanément l'orientation attentionnelle et l'inhibition est d'utiliser la tâche de flanker (Eriksen and Eriksen, 1974). Dans cette tâche, une flèche cible centrale est présentée simultanément avec des distracteurs, que l'on appelle des 'flankers'. La tâche du sujet est de rapporter la direction de la flèche centrale sans tenir compte des flankers. Ces derniers peuvent apporter une information congruente par rapport à la flèche centrale lorsqu'ils sont orientés dans la même direction. A l'inverse, les flankers peuvent apporter une information conflictuelle lorsqu'ils sont orientés dans le sens opposé. Dans les deux situations, les sujets doivent orienter leur attention vers la flèche centrale, de façon à faciliter son traitement. Afin de focaliser leur attention sur la cible, les sujets doivent également inhiber l'information véhiculée par les flankers. La réalisation de ces deux opérations cognitives est particulièrement difficile dans la situation non-congruente par rapport à la situation congruente. La situation non-congruente implique en outre une étape de détection du conflit. Au niveau comportemental, un effet d'interférence est classiquement décrit: les TRs sont plus longs et le taux d'erreurs plus élevé pour les essais non-congruents que pour les essais congruents.

Les différentes étapes de traitement impliquées dans la tâche de flanker ont été décrites à partir d'études d'ERP. L'orientation de l'attention vers le stimulus cible a tout d'abord été associée au composant N100. Bien que cette opération cognitive a été relativement peu étudiée dans la tâche de flanker, certains travaux ont montré une modulation de l'orientation attentionnelle en fonction de la congruence des flankers (Johnstone, Barry, Markovska,

Dimoska, & Clarke, 2009; Näätänen & Picton, 1987). La seconde étape consiste à détecter la présence d'informations conflictuelles avec la cible (Botvinick, Braver, Barch, Carter, & Cohen, 2001; Kerns, Cohen, MacDonald, Cho, Stenger, & Carter, 2004; Liu, Xiao, Shi, Zhao, & Liu, 2011). Ce processus d'évaluation a été associé au composant fronto-central N200, généré au niveau du cortex cingulaire antérieur et observé entre 300 et 500 ms post-stimulus (Johnstone et al., 2009; Van Veen & Carter, 2002; Yeung, Botvinick, & Cohen, 2004). Les résultats ont montré des amplitudes du composant N200 plus négatives pour les essais non-congruents que pour les essais congruents. Ces résultats ont été interprétés comme le reflet de la détection d'informations conflictuelles par rapport à la cible lors des essais non congruents. La tâche de flanker implique également deux étapes plus tardives associées à des composants générés au niveau du cortex cingulaire antérieur entre 300 et 750 ms post-stimulus: la P3 frontale et la P3 pariétale (Neuhaus, Koehler, Opgen-Rhein, Urbanek, Hahn, & Dettling, 2007; Neuhaus, Urbanek, Opgen-Rhein, Hahn, Ta, Koehler, Gross, & Dettling, 2010). La P3 frontale, connue sous le nom de Nogo P3, a été associée à l'inhibition des informations distrayantes apportées par les flankers (Neuhaus et al., 2010). De plus larges amplitudes de ce composant ont été rapportées pour les essais non-congruents que pour les essais congruents (Neuhaus et al., 2010). Ce résultat a été associé à l'inhibition des informations conflictuelles véhiculées par les flankers dans les essais non-congruents. La P3 pariétale, nommée P3b, a été associée à l'allocation des ressources attentionnelles et à la difficulté de la tâche (Neuhaus et al., 2007; Neuhaus et al., 2010). A l'inverse des résultats décrits au niveau de la Nogo P3, des amplitudes réduites de la P3b ont été rapportées pour les essais non-congruents par rapport aux essais congruents (Neuhaus et al., 2007; Neuhaus et al., 2010). Ce résultat est conforme à d'autres travaux montrant une réduction de l'amplitude de la P3b avec l'accroissement de la difficulté de la tâche (Hagen, Gatherwright, Lopez, & Polich, 2006).

La tâche de flanker sollicite donc un certain nombre d'étapes qui ont été décrites chez des sujets contrôles. Bien que ces étapes n'aient pas été étudiées dans la dyslexie, quelques travaux comportementaux et d'IRMf suggèrent des altérations. Deux études comportementales ont tout d'abord été menées chez des enfants dyslexiques (Bednarek et al., 2004; Facoetti & Turatto, 2000). La première étude a montré que l'effet d'interférence observé sur les TRs chez les sujets contrôles était accentué chez les sujets dyslexiques (Bednarek et al., 2004). Ces résultats ont été rattachés aux déficits de focalisation de l'attention sur la cible (Facoetti et al., 2000; Geiger et al., 2008; Lorusso et al., 2004) et d'inhibition de l'interférence de distracteurs (Bucholz and McKone, 2004; Iles et al., 2000; Vidyasagar and Pammer, 1999) décrits dans la dyslexie. La seconde étude a montré que l'effet d'interférence était fortement accru dans le champ visuel droit alors qu'il était absent dans le champ visuel gauche chez des enfants dyslexiques (Facoetti & Turatto, 2000). Ce dernier résultat va dans le sens de la théorie de la mini-héminégligence de la dyslexie (Hari & Koivikko, 1999), qui postule un traitement asymétrique de l'information chez les sujets dyslexiques. Une 'sur-distractibilité' par rapport aux informations présentées dans le champ visuel droit et une négligence des informations situées dans le champ visuel gauche ont en effet été rapportées. Les résultats de ces deux études suggèrent donc des altérations au niveau d'une ou de plusieurs des étapes impliquées dans la tâche de flanker sans permettre de déterminer avec précision quelle(s) étape(s) est (sont) concernée(s).

En IRMf, les capacités de traitement simultané de sujets dyslexiques ont été étudiées à partir d'une tâche de flanker modifiée (Peyrin et al., 2010; Peyrin et al., 2012). La tâche consistait en un jugement de similarité de catégorie (i.e., lettre/figure géométrique) entre une cible centrale et une cible périphérique. La cible périphérique pouvait être présentée de façon isolée ou entourée de flankers (i.e., 2 lettres X présentées de part et d'autre du stimulus périphérique). Les deux conditions (i.e., isolée vs. entourée) impliquaient le traitement

simultané de la lettre cible et de la lettre périphérique. La condition de présentation avec des flankers nécessitait en plus une sélection de la lettre périphérique parmi les deux distracteurs avant de pouvoir la comparer avec la lettre centrale. Dans cette tâche, les sujets dyslexiques présentaient une réduction des activations pariétales dans les conditions avec flankers par rapport aux sujets contrôles. Ce résultat montre une altération du traitement de plusieurs stimuli lorsque la situation implique une sélection d'une lettre cible parmi des distracteurs. Comme pour les études comportementales, ces travaux ne permettent pas de préciser la ou les étapes de traitement altérées chez les sujets dyslexiques. Il pourrait s'agir d'une difficulté à orienter son attention vers la cible ou à inhiber les informations apportées par les distracteurs.

L'objectif de l'étude 5 a été d'étudier l'orientation de l'attention et l'inhibition chez des adultes dyslexiques à partir de la tâche de flanker. Nous avons pu distinguer les étapes précoces (i.e., l'orientation de l'attention et la détection du conflit) et tardives (l'inhibition et l'allocation des ressources attentionnelles) impliquées dans cette tâche. De plus, comme des travaux ont rapporté une asymétrie de la distribution des ressources attentionnelles chez les lecteurs dyslexiques (Facoetti & Turatto, 2000), nous avons étudié ces opérations cognitives séparément au niveau des deux champs visuels. Les stimuli ont en outre été présentés verticalement, puisque l'expérience 4 a mis en évidence une difficulté particulière des dyslexiques pour ce format.

Enfin, de façon similaire aux études 2 et 3, nous avons comparé les données de sujets dyslexiques à celles de sujets contrôles appariés sur l'âge (i.e., des lecteurs experts) et celles de sujets contrôles appariés sur le niveau de lecture (i.e., des mauvais lecteurs).

## 2. Méthode

### Participants

34 adultes français ont participé à l'étude: 11 sujets dyslexiques (6 femmes et 5 hommes, moyenne d'âge de 24.3 ans  $\pm$  4.3 ans), 10 mauvais lecteurs (5 femmes et 5 hommes, moyenne d'âge de 24.5 ans,  $\pm$  4.6 ans) et 13 contrôles (8 femmes et 5 hommes, moyenne d'âge de 25.1 ans  $\pm$  2.8 ans). Les sujets dyslexiques ont tous été diagnostiqués par un orthophoniste durant l'enfance et ne présentaient pas d'autres troubles des apprentissages ni de déficit d'attention avec hyperactivité. L'ensemble des sujets dyslexiques ont suivi une remédiation d'en moyenne 5 ans auprès d'un orthophoniste. Cette remédiation était terminée depuis au moins 5 ans avant la passation de l'étude. Bien que présentant un niveau de lecture similaire aux sujets dyslexiques, le groupe de mauvais lecteurs n'avait pas d'histoire personnelle ou familiale de dyslexie ni d'aucun autre trouble des apprentissages. Comme c'est détaillé dans le Tableau 7, les trois groupes sont appariés sur l'âge chronologique, la durée des études supérieures, ainsi que l'intelligence non verbale. De façon plus importante, les sujets mauvais lecteurs et dyslexiques présentent un niveau de lecture ainsi que des habitudes de lecture similaires. Le niveau de lecture de ces deux groupes est en revanche significativement inférieur à celui des sujets contrôles, qu'il s'agisse des données brutes (i.e., latences de lecture et nombre d'erreurs) ou de l'âge de lecture normé, pour lequel on observe 32 mois d'écart entre les sujets dyslexiques et les sujets contrôles, et 25 mois d'écart entre les mauvais lecteurs et les sujets contrôles. Les habitudes de lecture sont également inférieures chez les sujets dyslexiques et chez les mauvais lecteurs, qui lisent en moyenne 10 livres en moins par an que les sujets contrôles. Enfin, les sujets dyslexiques présentent des scores de dénomination significativement inférieurs relativement aux deux autres groupes.

Tableau 7. Caractéristiques des groupes

	Dyslexiques (n = 11)	Mauvais lecteurs (n = 10)	Contrôles (n = 13)	Mauvais lecteurs vs Dyslexiques t(19)	Mauvais lecteurs vs Contrôles t(21)	Dyslexiques vs Contrôles t(22)
Sexe (homme: femme)	5 : 6	5 : 5	5 : 8			
Age (années)	24.3 (± 4.3)	24.5 (± 4.6)	25.1 (± 2.8)	-0.11 <i>ns</i>	0.33 <i>ns</i>	0.51 <i>ns</i>
Durée des études supérieures	2.3 (± 2)	2 (± 1.3)	2.2 (± 1.9)	-0.37 <i>ns</i>	0.22 <i>ns</i>	-0.15 <i>ns</i>
Matrices de Raven (rang centile)	84.1 (± 10.4)	82 (± 11)	86.9 (± 14.1)	0.29 <i>ns</i>	0.67 <i>ns</i>	0.55 <i>ns</i>
<b>Test de lecture de l'Alouette</b>						
<i>Age moyen de lecture normé (mois)</i>	138.5 (± 12.1)	145.5 (± 7.8)	171 (±0)	-1.63 <i>ns</i>	10.62***	9.7***
<i>Temps moyen (min)</i>	2.1 (± .3)	1.9 (± .1)	1.5 (± .1)	1.64 <i>ns</i>	-7.93***	-7.16***
<i>Nombre d'erreurs moyen</i>	8 (± 4)	5.9 (± 1.1)	1.8 (± 1.6)	1.58 <i>ns</i>	-7.01**	-5.12***
<b>Latences de dénomination (secondes)</b>						
<i>Images</i>	67.7 (±8.5)	60.5 (±4.9)	57.9 (±7)	2.32*	-0.98 <i>ns</i>	-3.1**
<i>Chiffres</i>	43.2 (±10.8)	36.2 (±5.1)	35.2 (±9)	1.84 <sup>p=.08</sup>	-0.33 <i>ns</i>	-1.99*
<i>Couleurs</i>	59.9 (±9.7)	51.7 (±7.6)	53 (±7.3)	2.1*	0.41 <i>ns</i>	-1.99*
<b>Habitudes de lecture</b>						
<i>Nombre moyen de livres lus par an</i>	7.4 (±10.3)	7.6 (±10.3)	18.1 (±12.2)	-0.03 <i>ns</i>	2.1*	2.29*
<b>Remédiation (années)</b>						
<i>Durée moyenne</i>	5.2 (±2.5)					
<i>Age moyen de début</i>	8 (±1.6)					
<i>Age moyen de fin</i>	13.2 (±2)					

Note: Différence inter-groupes (test t): *ns*, non significatif, \*  $p \leq .05$ , \*\*  $p \leq .01$ , \*\*\*  $p \leq .001$ .

### Procédure

Les participants ont réalisé une version modifiée de la tâche de Flanker (Eriksen and Eriksen, 1974) basée sur la Lateralized Attention Network Test (Greene, Barnea, Herzberg,

Rassis, Neta, Raz, & Zaidel, 2008), qui permet d'étudier les opérations de l'attention visuo-spatiale, et notamment l'orientation et la sélection attentionnelle, au sein de chaque champ visuel. Comme c'est illustré sur la Figure 29, cinq flèches verticales (orientées vers le haut ou vers le bas), représentant  $3.8^\circ$  du champ visuel, apparaissaient à  $1.15^\circ$  à gauche ou à droite d'une croix de fixation centrale. La flèche centrale était la cible et pouvait être présentée simultanément avec des flankers congruents (i.e., des flèches orientées dans la même direction) ou non-congruents (i.e., des flèches orientées dans la direction opposée). Les participants devaient indiquer la direction vers laquelle la flèche cible était orientée sans tenir compte des flankers ni du côté d'apparition des stimuli. Les réponses devaient être données le plus rapidement et le plus précisément possible au moyen de deux touches du clavier. Les sujets devaient appuyer sur la touche 'Ctrl' de droite avec leur main dominante (i.e., la main droite) si la flèche cible était orientée vers le haut et sur la touche 'Ctrl' de gauche avec leur main non dominante (i.e., la main gauche) si la flèche cible était orientée vers le bas. Au début de chaque essai, une croix de fixation centrale était présentée pour un intervalle variable de 300 à 1500 ms ( $t_1 = 300, 600, 900, 1200$  or  $1500$  ms), suivie des stimuli qui restaient à l'écran jusqu'à ce que le participant ait répondu ( $<2000$  ms). Comme c'est illustré sur la Figure 29, une période de fixation variable ( $t_2$ ), dépendant du temps  $t_1$  et du temps de réponse, suivait la réponse du participant (ou les 2000 ms si aucune réponse n'était faite) et assurait une durée totale de chaque essai de 3500 ms. Les réponses effectuées après 1500 ms étaient comptabilisées comme des erreurs d'omission. La tâche comprenait 140 essais congruents et 140 essais non congruents et était divisée en deux blocs. Les participants réalisaient une session d'entraînement avant la réalisation de la tâche.

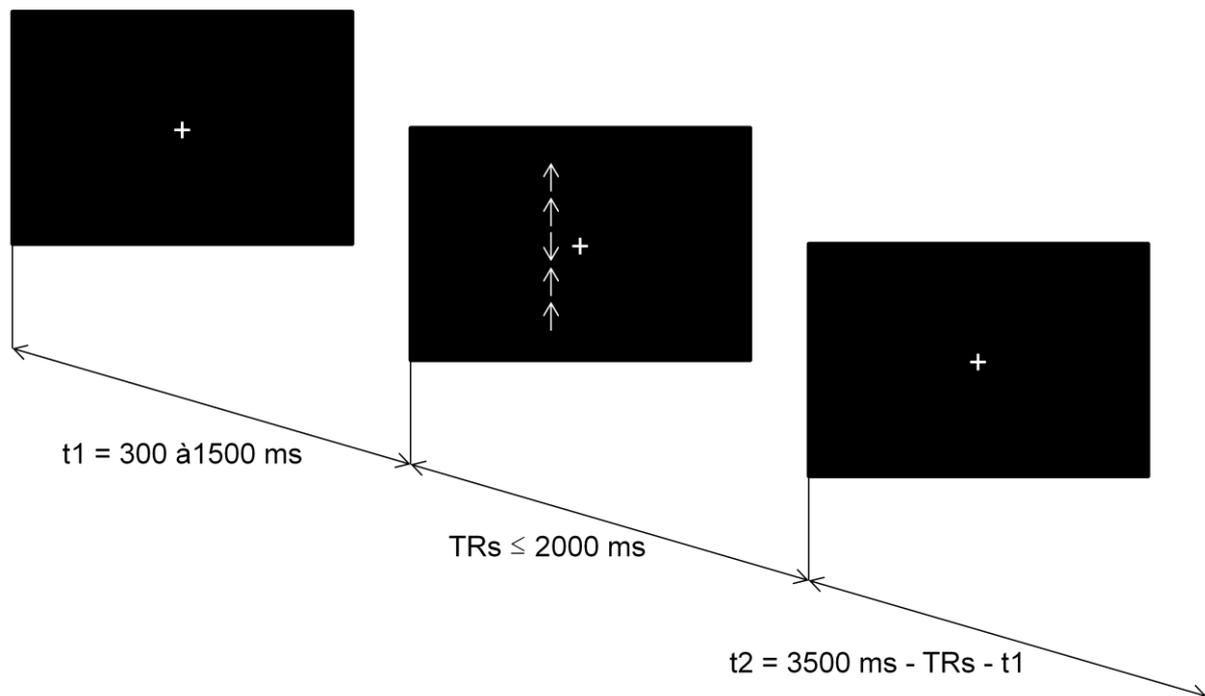


Figure 29. Déroulement d'un essai. A chaque essai, 5 flèches verticales (orientées vers le haut ou vers le bas) sont présentés à gauche ou à droite d'un point de fixation central. La flèche cible peut être entourée de flankers congruents (des flèches orientées dans la même direction) ou non-congruents (des flèches orientées dans la direction opposée). Les participants doivent indiquer la direction de la flèche du milieu.

### Analyses ERP

Les essais correspondant à de mauvaises réponses ou des réponses dépassant deux écarts-types de la moyenne des TRs de chaque participant ont été exclus des analyses, induisant la réjection de 5 % des données pour les dyslexiques, 3.6% pour les mauvais lecteurs et 2.4% pour les contrôles. Le calcul des grandes moyennes pour chaque condition au sein de chaque groupe a été basé sur une moyenne de 58.5 essais pour les dyslexiques (59 essais pour la condition congruente, 58 essais pour la condition non congruente), 57 essais pour les mauvais lecteurs (56 essais pour les mots, 58 essais pour les non-mots) et 57.5 essais pour les contrôles (56 essais pour la condition congruente, 59 essais pour la condition non congruente). Les amplitudes des composants N100 et N200 ont été basées sur des mesures de

pics. L'amplitude du pic du composant N100 a été mesurée entre 100 et 200 ms et celle du composant N200 entre 400 et 500 ms au niveau de Fz. Les amplitudes moyennes des composants Nogo P3 et P3b ont été respectivement mesurées entre 525 et 675 ms au niveau de Fz et entre 370 et 550 ms au niveau de Pz. Les fenêtres d'analyses ont été déterminées à partir des tracés des grandes moyennes.

### **3. Résultats**

Aucun effet du champ visuel n'était significatif sur les données comportementales et électrophysiologiques. Les essais des deux champs visuels ont donc été moyennés.

#### Résultats comportementaux

Une ANOVA a été réalisée sur les TRs et le pourcentage d'erreurs avec un facteur intergroupe (i.e., Groupe: dyslexiques vs. mauvais lecteurs vs. contrôles) et un facteur intragroupe (i.e., Congruence: congruent vs. non-congruent).

L'analyse des TRs (Figure 30) montre un effet significatif de la Congruence ( $F(1,31)=142.8$ ,  $p<.001$ ) et une absence d'interaction Groupe x Congruence ( $F<1$ ). Dans les trois groupes de sujets, les TRs sont plus élevés pour les essais non-congruents que pour les essais congruents.

L'analyse du pourcentage d'erreurs (Figure 30) montre un effet significatif de la Congruence ( $F(1,31)=12.6$ ,  $p<.01$ ) ainsi qu'une interaction marginale Groupe x Congruence ( $F(1,31)=2.8$ ,  $p=.07$ ). Des comparaisons planifiées mettent en évidence un effet de Congruence (i.e., un taux d'erreur plus élevé pour les essais non-congruents que pour les essais congruents) chez les dyslexiques ( $F(1,31)=10.3$ ,  $p<.01$ ) et les mauvais lecteurs ( $F(1,31)=7$ ,  $p<.01$ ) alors que l'effet n'est pas significatif chez les contrôles ( $F<1$ ). Enfin, les analyses montrent un effet tendanciel du Groupe ( $F(1,31)=2.8$ ,  $p=.07$ ), avec un taux d'erreurs plus élevé chez les dyslexiques que chez les contrôles ( $F(1,31)=5.6$ ,  $p<.05$ ). Les mauvais

lecteurs présentent un taux d'erreur similaire aux dyslexiques ( $F < 1$ ) et marginalement supérieur à celui des contrôles ( $F(1,31)=3.3, p=.07$ ).

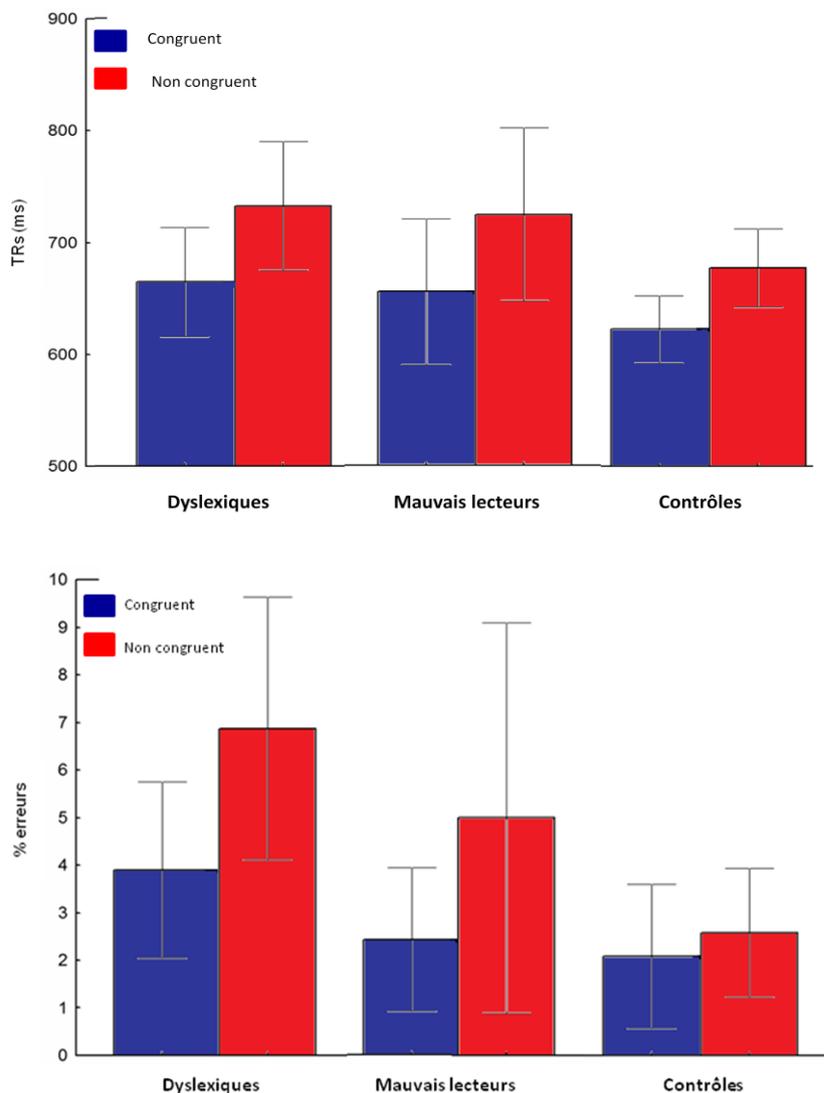


Figure 30. Temps de réaction moyens (TRs) et pourcentage d'erreurs (% erreurs) en fonction du groupe et du type de stimulus.

### Résultats électrophysiologiques

Une ANOVA a été réalisée sur les amplitudes des composants N100, N200, Nogo P3 et P3b, avec un facteur intergroupe (i.e., Groupe: dyslexiques vs. mauvais lecteurs vs. contrôles) et un facteur intragroupe (i.e., Congruence: congruent vs. non-congruent).

Les tracés des grandes moyennes au niveau du site frontal (Figure 31) montrent une succession des composants N100 (à 160 ms), P200 (à 220 ms), suivis des composants N2b (à 315 ms) et N200 (à 450 ms). La Nogo P3 est la positivité visible après le composant N2 (entre 525 et 675 ms). Les tracés des grandes moyennes au niveau du site pariétal (Figure 32) montrent une large positivité: le composant P3b (entre 370 et 550).

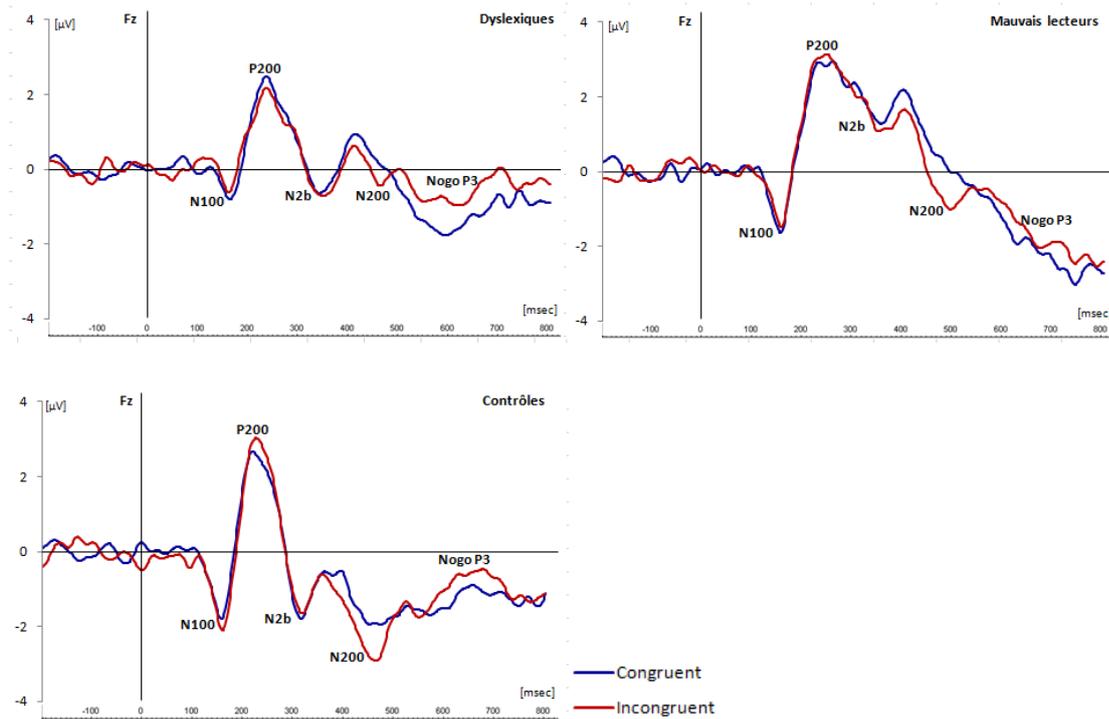


Figure 31. Tracés ERP des essais congruents et non-congruents pour chaque groupe au niveau du site frontal (Fz).

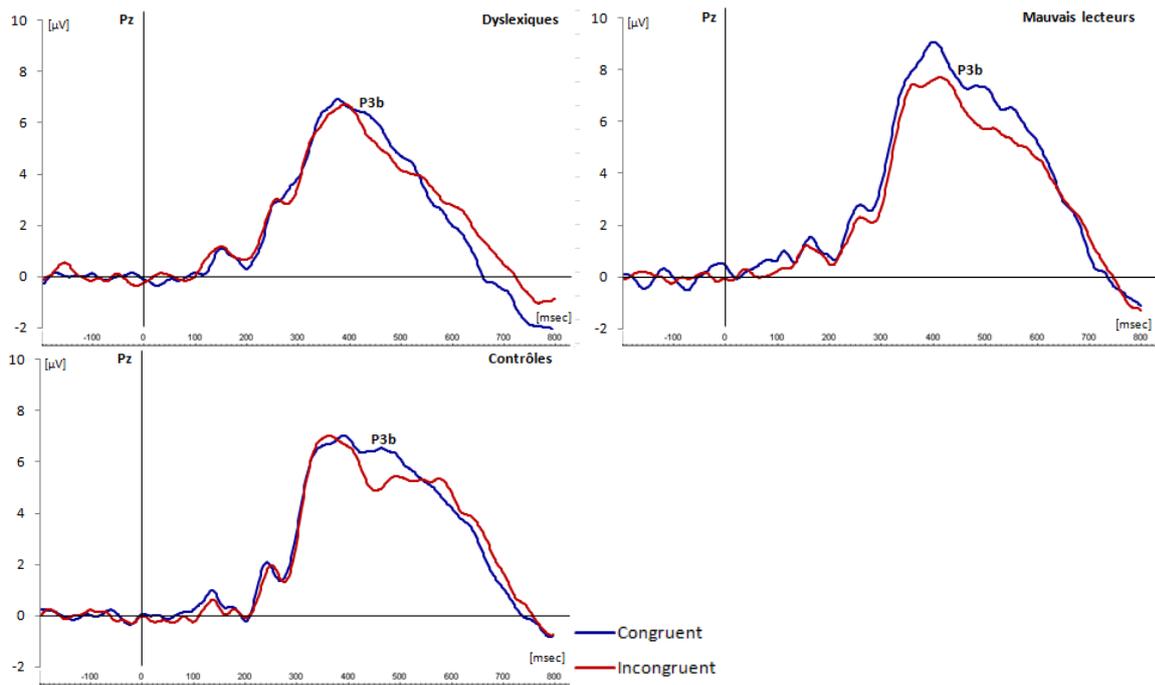


Figure 32. Tracés ERP des essais congruents et non-congruents pour chaque groupe au niveau du site pariétal (Pz).

### Composants précoces

L'analyse du composant N100 montre que l'interaction Groupe x Congruence est significative ( $F(1,31)=3.3, p<.05$ ). Chez les contrôles, l'amplitude du pic du composant N100 est plus négative pour les essais non-congruents que pour les essais congruents ( $F(1,31)=4.2, p<.05$ ). Aucune différence entre les deux types d'essais n'est en revanche présente chez les dyslexiques ( $F(1,31)=1.4, p>.1$ ) et les mauvais lecteurs ( $F<1$ ). Les analyses révèlent également un effet du Groupe ( $F(1,31)=4, p<.05$ ), avec des amplitudes plus négatives du composant N100 dans le groupe contrôle par rapport aux groupes de sujets dyslexiques ( $F(1,31)=7.8, p<.01$ ). La différence est marginale entre les contrôles et les mauvais lecteurs ( $F(1,31)=3.4, p=.07$ ) alors qu'aucune différence n'est présente entre les dyslexiques et les mauvais lecteurs.

L'analyse de l'amplitude du composant N200 montre un effet de Congruence ( $F(1,31)=8.6, p<.01$ ) ainsi qu'une interaction Groupe x Congruence ( $F(1,31)=3.4, p<.05$ )

significatifs. L'amplitude du pic de la N200 est plus négative pour les essais non-congruents que pour les essais congruents chez les contrôles ( $F(1,31)=6.8, p<.01$ ) et les mauvais lecteurs ( $F(1,31)=8.4, p<.01$ ). Cet effet est en revanche absent chez les dyslexiques ( $F<1$ ). Les analyses montrent aussi un effet significatif du Groupe ( $F(1,31)=5.3, p<.01$ ), les amplitudes du composant N200 étant plus négatives chez les contrôles par rapport aux dyslexiques ( $F(1,31)=8.7, p<.01$ ) et aux mauvais lecteurs ( $F(1,31)=6.5, p<.02$ ). Aucune différence n'est présente entre les dyslexiques et les mauvais lecteurs ( $F<1$ ).

### Composants tardifs

Comme c'est illustré sur la Figure 31, les amplitudes du composant Nogo P3 sont plus positives pour les essais non-congruents que pour les essais congruents chez les contrôles et les dyslexiques mais pas chez les mauvais lecteurs. L'analyse de l'amplitude moyenne du composant Nogo P3 montre seulement un effet significatif de la Congruence ( $F(1,31)=3.9, p<.05$ ) et une absence d'interaction Groupe x Congruence.

L'analyse de l'amplitude moyenne du composant P3b montre un effet significatif de la Congruence ( $F(1,31)=8.7$ ) et une absence d'interaction Groupe x Congruence ( $F<1$ ). Les amplitudes de la P3b sont moins positives pour les essais non-congruents que pour les essais congruents dans les trois groupes de sujets.

## **4. Discussion**

Cette étude avait pour objectif d'évaluer les étapes précoces (i.e., l'orientation de l'attention et la détection du conflit) et tardives (i.e., l'inhibition et l'allocation des ressources attentionnelles) impliquées dans la tâche de flanker chez des adultes dyslexiques. Nos résultats n'ont pas permis de mettre pas en évidence des différences en fonction du champ visuel chez les sujets dyslexiques, sans doute en raison du design expérimental. Dans notre

étude, les stimuli étaient présentés jusqu'à la réponse des sujets. De plus, la cible et les flankers apparaissaient dans le même champ visuel. Il est possible que le traitement asymétrique de l'information ne puisse être mis en évidence que dans certaines situations chez les sujets dyslexiques, par exemple pour des temps de présentation réduits et lorsque la cible et les distracteurs appartiennent à des hémichamps différents. Une asymétrie de la distribution de l'attention a en effet été décrite chez des enfants dyslexiques à partir d'une tâche de flanker avec des temps de présentation des stimuli plus courts et des cibles centrales présentées avec un flanker périphérique (Facoetti & Turatto, 2000).

### Résultats comportementaux

Les lecteurs experts, les mauvais lecteurs et les sujets dyslexiques présentent des latences de réponses ralenties pour les essais non-congruents relativement aux essais congruents. Cet effet est similaire entre les 3 groupes de sujets. Des différences ont pourtant été mises en évidence dans la dyslexie mais uniquement chez l'enfant, avec un effet d'interférence plus marqué sur les TRs chez les sujets dyslexiques que chez les sujets contrôles (Bednarek et al., 2004). L'absence de différence entre nos groupes pourrait être liée à l'âge des participants, la tâche de flanker ayant été montrée comme étant plus difficile à réaliser chez des enfants que chez des adultes (Rueda, Posner, Rothbart, & Davis-Stober, 2004). Il est donc possible que les latences de réponses soient une mesure plus sensible pour des cohortes d'enfants que pour des cohortes d'adultes dans la tâche de flanker.

En ce qui concerne le taux d'erreur, des différences existent entre nos groupes de sujets. Les altérations sont communes aux individus présentant un faible niveau de lecture, bien qu'étant plus marquées chez les sujets dyslexiques. L'augmentation globale du taux d'erreurs des sujets dyslexiques et des mauvais lecteurs relativement aux lecteurs experts traduit tout d'abord une difficulté à réaliser la tâche. Cette difficulté semble être accrue pour

les essais non-congruents, puisque les performances des sujets dyslexiques et des mauvais lecteurs sont altérées pour les essais non-congruents relativement aux essais congruents, alors que ce n'est pas le cas chez les lecteurs experts. Les sujets présentant un faible niveau de lecture pourraient donc avoir une difficulté particulière à réaliser une tâche de sélection d'une cible présentée simultanément avec des distracteurs, surtout lorsque ceux-ci apportent une information conflictuelle par rapport à la cible. Ce déficit apparaît comme étant plus marqué pour le groupe de sujets dyslexiques. Les sections suivantes apportent des précisions sur les opérations cognitives qui sont altérées chez les lecteurs dyslexiques.

### Résultats électrophysiologiques

#### Etapes de traitement précoces

Chez les sujets contrôles, les étapes de traitement précoces impliquées dans la tâche de flanker sont modulées en fonction de la nature de l'information distractive présentée simultanément avec la cible. Les amplitudes des composants N100 et N200 sont en effet plus négatives pour les essais non-congruents par rapport aux essais congruents. L'effet observé sur le composant N100 traduit une modulation de l'orientation automatique de l'attention vers la cible en fonction de la compatibilité des informations qui l'accompagnent (Näätänen & Picton, 1987). L'effet observé sur le composant N200 correspond à une détection de la présence d'informations conflictuelles avec la cible dans les essais non-congruents, comme décrit dans la littérature (Yeung et al., 2004).

L'orientation attentionnelle ainsi que la détection du conflit sont altérées chez les sujets dyslexiques. Certains déficits sont communs avec les sujets mauvais lecteurs. L'effet observé sur le composant N100 chez les lecteurs experts est en effet absent dans les deux autres groupes. Chez les sujets dyslexiques et les mauvais lecteurs, l'orientation automatique de l'attention vers un stimulus cible ne serait donc pas influencée par la nature de

l'information qui entoure cette cible. Des déficits d'orientation attentionnelle ont déjà pu être rapportés dans la dyslexie au niveau comportemental dans des tâches d'amorçage chez des enfants (Facoetti et al., 2003; Facoetti et al., 2000; Facoetti et al., 2006) et chez des adultes (Roach & Hogben, 2004). Nos résultats montrent en plus que ce défaut d'orientation attentionnelle pourrait être une caractéristique des individus présentant un faible niveau de lecture.

Par contre, d'autres altérations semblent spécifiques à la dyslexie. Les sujets dyslexiques sont en effet les seuls à présenter une absence de modulation du composant N200 en fonction de la congruence de l'information qui accompagne le stimulus cible. Malgré un trouble d'orientation attentionnelle, les mauvais lecteurs seraient capables de détecter la présence d'informations non compatibles avec la cible. Chez les sujets dyslexiques en revanche, les deux étapes de traitement précoce impliquées dans la tâche de flanker sont déficitaires. Certains travaux ont déjà pu mettre en évidence un déficit du traitement attentionnel précoce au niveau des composants N100 (Wimmer et al., 2001) et N200 (Dhar et al., 2008; Jednorog et al., 2011) dans la dyslexie. Les lecteurs dyslexiques pourraient donc être caractérisés par un déficit global des premières étapes de traitement attentionnel.

#### Etapas de traitement tardives et conclusion

Les résultats montrent chez le normolecteur une augmentation des positivités de la Nogo P3 et une diminution des positivités de la P3b pour les essais non-congruents par rapport aux essais congruents. Ces résultats répliquent ceux de la littérature (Neuhaus et al., 2007; Neuhaus et al., 2010). Ces étapes de traitement tardives, qui correspondent à l'inhibition des flankers non congruents (Nogo P3) et à l'allocation des ressources attentionnelles (P3b), sont préservées chez les sujets dyslexiques et les mauvais lecteurs, qui présentent un patron d'effets similaires aux lecteurs experts.

En résumé, nos résultats montrent que la difficulté à réaliser une tâche de sélection de cible chez les sujets dyslexiques peut être attribuée à un déficit d'orientation attentionnelle et de détection du conflit. Nos résultats montrent en outre que le trouble d'orientation attentionnelle est une caractéristique des sujets présentant un faible niveau de lecture tandis que le déficit de détection est spécifique à la dyslexie.

## Chapitre 4. Discussion

L'objectif de ce projet de recherche a été d'étudier la reconnaissance visuelle des mots chez des adultes dyslexiques à travers l'implication des voies ventrale (études 1, 2 et 3) et dorsale (études 1, 2, 4 et 5). Les données de nos études apportent des informations sur les deux procédures d'analyse des stimuli écrits: le traitement en parallèle et le traitement sériel.

Le traitement en parallèle a été étudié à partir de mots présentés horizontalement. Nos résultats montrent des différences entre les lecteurs experts et les lecteurs dyslexiques au niveau des voies ventrale et dorsale. Pour la voie ventrale, les effets de lexicalité (études 1, 2 et 3) et de fréquence lexicale (étude 3) sur l'amplitude du composant N170/N200 diffèrent entre les groupes de sujets contrôles et de sujets dyslexiques. Ce résultat traduit un accès au lexique mental distinct chez les lecteurs dyslexiques. Nos données montrent aussi des altérations d'un processus sous-tendu par la voie dorsale. Notre expérience 4 montre ainsi que même pour des mots présentés horizontalement, les sujets dyslexiques manifestent un trouble de sélection attentionnelle d'une lettre cible. Les altérations observées chez les sujets dyslexiques au niveau des deux voies suggèrent que différents facteurs ont pu contribuer à leurs difficultés d'analyse en parallèle des mots.

Le traitement sériel a été étudié à partir de mots présentés verticalement (études 1, 2 et 4). Comme pour le format horizontal, les sujets dyslexiques manifestent des déficits au niveau des deux voies. En ce qui concerne la voie ventrale, ces derniers montrent un effet de lexicalité massif (études 1 et 2). Cet effet est absent chez les lecteurs experts, comme ce qui a déjà été décrit dans une étude antérieure pour du matériel dégradé (Kim et al., 2012). Lorsque le format de présentation est inhabituel, la voie ventrale serait sollicitée pour le traitement rapide des unités sublexicales qui composent les stimuli écrits. Ces unités peuvent correspondre à des lettres ou à des groupes de lettres. Quelles que soient les unités

sublexicales prises en compte, le traitement ne devrait pas différer entre des mots et des pseudomots, expliquant l'absence d'effet de lexicalité chez les lecteurs experts. Chez les sujets dyslexiques, la présence d'un tel effet traduit la mise en place de processus alternatifs. Il est par exemple possible que les lecteurs dyslexiques prennent en compte des unités sublexicales plus larges que les normolecteurs. Ils pourraient même tenter de traiter les mots dans leur forme globale, comme un objet visuel. Rappelons que l'effet de lexicalité des études 1 et 2 est observé en bilatéral. Des travaux ont justement montré que la reconnaissance des objets sollicite la voie ventrale bilatéralement (Rossion et al., 2003; Tanaka & Curran, 2001). Quelle que soit la nature des compensations mises en place chez les sujets dyslexiques, elles traduisent une altération du traitement expert des unités élémentaires de l'écrit au niveau de la voie ventrale. Ce déficit pourrait avoir plusieurs origines. Nos données montrent notamment un ralentissement du déplacement attentionnel (études 1 et 2). Les résultats de l'expérience 4 révèlent en outre que le déficit de sélection attentionnelle des sujets dyslexiques est particulièrement marqué dans une situation de traitement sériel. Comme pour le format horizontal, les anomalies observées chez les sujets dyslexiques lors du traitement sériel des stimuli écrits pourraient avoir des origines multiples impliquant les voies ventrale et dorsale.

En plus de décrire des altérations des deux procédures d'analyse des stimuli écrits, conformément à ce qui a déjà été observé dans la littérature chez les lecteurs dyslexiques (Ziegler et al., 2008), nos données apportent des informations précises sur la nature possible de ces déficits. Les sections suivantes détaillent les résultats obtenus concernant la spécialisation de la voie ventrale (études 1, 2 et 3) ainsi que les traitements phonologique (études 1, 2, 3 et 5) et attentionnel (études 1, 2, 4 et 5) sous-tendus par la voie dorsale.

Dans ce projet de recherche, nous avons évalué des adultes. Les altérations mises en évidence chez les sujets dyslexiques peuvent donc être considérées comme des déficits persistants et non pas comme un possible retard de mise en place de traitements spécialisés pour l'écrit. De plus, la sélection de sujets dyslexiques ayant suivi durant l'enfance une longue remédiation de lecture, de plus de 5 ans en moyenne, permet d'exclure l'impact d'une faible exposition à l'écrit. Enfin, la comparaison d'un groupe de lecteurs dyslexiques à un groupe contrôle apparié sur le niveau de lecture (i.e., des mauvais lecteurs) nous a permis d'isoler les spécificités de la dyslexie.

## **I. La spécialisation de la voie ventrale**

Durant l'apprentissage de la lecture, l'exposition répétée à l'écrit s'accompagne chez les normolecteurs d'une spécialisation de la voie ventrale à partir d'un mécanisme de recyclage neuronal (Dehaene & Cohen, 2007). Cette spécialisation permet une reconnaissance rapide des unités élémentaires du langage écrit (i.e., les lettres et les groupes de lettres) ainsi que des mots familiers. Le modèle LCD (Dehaene et al., 2005) propose différents niveaux de spécialisation de la voie ventrale pour le traitement de l'écrit. Les résultats combinés des études 1 et 2 pour le format horizontal (composant N200) et de l'étude 3 (composant N170) apportent des informations sur certains de ces niveaux de spécialisation chez les adultes dyslexiques.

### **1. Le traitement expert des mots familiers**

Les lecteurs dyslexiques manifestent une altération du traitement en parallèle des stimuli écrits. D'une part, l'effet de fréquence lexicale observé sur l'amplitude du composant N170 chez les lecteurs experts est absent chez les lecteurs dyslexiques (étude 3). D'autre part, l'effet de lexicalité, présent chez les sujets contrôles sur l'amplitude du composant N170/N200, est absent (étude 3) ou en sens opposé (études 1 et 2 pour le format horizontal) chez les sujets dyslexiques. Ces résultats répliquent l'hétérogénéité de la littérature à ce sujet. Des travaux ont ainsi rapporté une absence d'effet de lexicalité (Shaul et al., 2012; Van der Mark et al., 2009) ou un effet en sens opposé (Dujardin et al., 2011) chez des sujets dyslexiques par rapport à des sujets contrôles. L'hétérogénéité de ces résultats peut refléter différentes manifestations d'un même trouble: un déficit d'accès rapide au lexique chez les lecteurs dyslexiques. Les données de la littérature concernant l'effet de longueur des mots entrent en faveur de cette conclusion (Dürrwächter et al., 2010; Zoccolotti et al., 2005).

Nos données montrent que ce déficit n'est pas spécifique à la dyslexie, puisque la sensibilité du composant N170 aux aspects lexicaux est également absente chez les mauvais lecteurs (études 1, 2 et 3). Dans le cadre du modèle LCD (Dehaene et al., 2005), ces données peuvent être interprétées comme un défaut de mise en place du niveau le plus approfondi de spécialisation de la voie ventrale pour l'écrit: le traitement expert de mots courts et de morphèmes. Un défaut du traitement expert des séquences de lettres familières relativement à des séquences de lettres nouvelles (i.e., absence d'effet de lexicalité) et des mots les plus familiers du langage écrit (i.e., absence d'effet de fréquence lexicale) pourrait en partie avoir compromis l'acquisition d'un niveau de lecture expert chez ces deux groupes de sujets.

Enfin, il convient de rappeler que les sujets dyslexiques présentent une sensibilité aux formes lexicales les plus fréquentes au niveau de l'hémisphère droit. Ce résultat est compatible avec les sur-activations observées classiquement chez des adultes (Pugh et al., 2001; Shaywitz et al., 1998) et chez des enfants dyslexiques (Shaywitz et al., 2002) au niveau du gyrus fusiforme droit. Il est possible que les lecteurs dyslexiques aient mis en place une certaine forme de reconnaissance compensatoire des mots les plus fréquemment rencontrés dans le langage au niveau de l'hémisphère droit.

## **2. Le traitement expert des caractères écrits**

En plus d'une altération de la spécialisation de la voie ventrale pour la reconnaissance des mots familiers, les sujets dyslexiques présentent une absence de traitement expert des caractères écrits (étude 3). Chez ces derniers, les amplitudes du composant N170 sont en effet similaires pour des stimuli écrits relativement à des stimuli visuels non langagiers (i.e., des séquences de symboles). Ce résultat est observable de façon stable chez l'ensemble des sujets dyslexiques et apporte plusieurs informations concernant le traitement des stimuli écrits dans la dyslexie.

Relativement au modèle LCD (Dehaene et al., 2005), ce résultat peut être interprété comme une absence de spécialisation de la voie ventrale pour le traitement expert des lettres chez les lecteurs dyslexiques. L'exposition aux caractères écrits ne s'accompagnerait pas de la mise en place de traitements distincts des stimuli visuels en fonction de leur caractère langagier. Des résultats de la littérature montrent que le défaut de spécialisation du gyrus fusiforme ne se généralise pas à l'ensemble des stimuli visuels dans la dyslexie. Une préservation du traitement spécialisé d'autres catégories de stimuli visuels, tels que des faux caractères (Kronschnabel et al., 2013), des damiers ou des maisons (Monzalvo et al., 2012) a ainsi été décrite chez des enfants dyslexiques. Les altérations se limiteraient donc au traitement expert des stimuli écrits. Il est donc possible que dans cette population, le déficit se situe au niveau du recyclage neuronal du gyrus fusiforme gauche pour le traitement des caractères du langage écrit (Dehaene & Cohen, 2007). Une telle altération pourrait avoir rendu particulièrement difficile le traitement rapide des lettres/groupes de lettres lorsque les stimuli écrits étaient présentés verticalement dans les études 1 et 2. Ceci permettrait d'expliquer la mise en place d'un traitement alternatif des séquences de lettres chez les sujets dyslexiques pour le format vertical.

Nos données suggèrent en outre que le défaut de spécialisation du composant N170 pour l'écrit peut être considéré comme une signature électrophysiologique de la dyslexie. Nos résultats montrent en effet qu'un traitement expert des caractères écrits est présent chez des adultes mauvais lecteurs, pour lesquels l'apprentissage de la lecture n'a pas permis l'acquisition d'un niveau de lecture expert. Un déficit du traitement expert de l'écrit ne peut donc pas être rattaché à un faible niveau de lecture mais peut bien être considéré comme le signe d'une spécialisation atypique des structures occipito-temporales gauches propres à la dyslexie. Il est important de rappeler que nos résultats ont été obtenus à partir d'un groupe de sujets dyslexiques adultes qui ont suivi une scolarité normale et bénéficié d'une remédiation

de lecture de plusieurs années. Les caractéristiques de nos sujets écartent donc la possibilité que ce déficit soit la conséquence d'une faible exposition à l'écrit. Les lecteurs dyslexiques apparaissent comme étant les seuls individus à ne pas développer un traitement expert de l'écrit suite à l'apprentissage de la lecture ou à un entraînement approprié. Il n'est pas nécessaire d'avoir un niveau de lecture expert (i.e., les données des mauvais lecteurs de nos études) ni même de savoir lire pour développer cette spécialisation. Un traitement expert de l'écrit a ainsi été rapporté chez des pré-lecteurs ayant suivi un entraînement approprié (Brem et al., 2010). Une reconnaissance experte de l'écrit s'observe également lorsque l'apprentissage de la lecture a lieu à l'âge adulte. C'est ce qui a été rapporté chez des adultes pour un langage artificiel (Yoncheva et al., 2010) ou encore chez des anciens illettrés (Carreiras et al., 2009; Dehaene et al., 2010).

Une altération du fonctionnement du gyrus fusiforme gauche a été proposée comme corrélat neuro-anatomique de la dyslexie développementale (Paulesu et al., 2001). Nos résultats supportent cette idée et montrent en plus une altération du marqueur électrophysiologique de l'activité de la VWFA: le composant N170. Un défaut de la spécialisation de ce composant pour le traitement expert de l'écrit peut donc être considéré comme un corrélat électrophysiologique spécifiquement rattaché à la dyslexie.

### **3. Le traitement expert des groupes de lettres**

Les résultats combinés des études 1 et 2 pour le format horizontal et de l'étude 3 nous ont permis d'étudier le traitement expert des mots familiers et des lettres chez des adultes dyslexiques. Nous montrons que ces deux niveaux de spécialisation de la voie ventrale sont altérés chez ces sujets. Nous n'avons en revanche pas analysé la spécialisation de la voie ventrale pour le traitement des groupes de lettres fréquemment associés dans le langage écrit. Le traitement expert des bigrammes correspond à un niveau intermédiaire de spécialisation de

la voie ventrale dans le modèle LCD (Dehaene et al., 2005). Ce niveau de spécialisation a été illustré à partir de travaux menés chez des lecteurs experts qui montrent davantage d'activations du gyrus fusiforme gauche pour des groupes de lettres fréquemment associées que pour des groupes de lettres plus rarement associées (Binder et al., 2006; Vinckier et al., 2007). Compte tenu de nos résultats, on pourrait faire l'hypothèse d'une altération de l'ensemble des niveaux de spécialisation de la voie ventrale chez les lecteurs dyslexiques, et donc d'un défaut du traitement expert des fréquentes associations de lettres chez ces sujets.

De récents travaux permettent néanmoins d'envisager une hypothèse alternative. Doignon-Camus et al. (2012) ont étudié la nature des unités sublexicales automatiquement perçues chez des enfants au moyen du paradigme des conjonctions illusoire. Chez les sujets contrôles, les unités sublexicales perçues dans les mots étaient à la fois définies par les informations provenant de la syllabe phonologique et de la redondance orthographique. Chez les enfants dyslexiques, les unités sublexicales perçues dans les mots étaient uniquement définies à partir de la redondance orthographique. Ce résultat suggère une capacité des enfants dyslexiques à exploiter la fréquence des associations de lettres pour traiter le langage écrit. L'absence d'un traitement expert des lettres observée dans notre expérience 3 chez les sujets dyslexiques n'est pas incompatible avec une certaine préservation d'un traitement expert des associations fréquentes de lettres. Nous pouvons faire l'hypothèse que chez les lecteurs dyslexiques, différentes unités élémentaires seraient codées pour traiter le langage écrit. Les différents degrés de spécialisation de la voie ventrale pour l'écrit pourraient ne pas être les mêmes que chez les lecteurs experts. Il est possible que compte tenu de leurs déficits de recyclage neuronal, les lecteurs dyslexiques apprennent au départ à traiter le langage écrit non pas à partir des lettres mais à partir des fréquentes associations de lettres. Une telle stratégie pourrait permettre aux lecteurs dyslexiques d'analyser rapidement les associations de lettres récurrentes du langage écrit mais rendrait particulièrement difficile l'analyse des associations

de lettres plus rares. De plus, une même lettre pourrait être rapidement traitée uniquement lorsque la lettre adjacente lui est fréquemment associée. Même si les lecteurs experts sont sensibles à la fréquence des bigrammes (Conrad et al., 2009; Doignon & Zagar, 2005; Mathey et al., 2006), un codage des unités élémentaires (i.e., les lettres) leur permet de traiter rapidement les lettres même lorsqu'elles font parties d'un bigramme rare. Nous pouvons donc faire l'hypothèse qu'un effet de fréquence des bigrammes puisse être observé chez les lecteurs dyslexiques sur l'amplitude du composant N170. De plus, il est possible que cet effet soit latéralisé à droite, comme l'effet de fréquence lexicale que nous observons chez les lecteurs dyslexiques dans l'étude 3. Il serait donc important d'étudier la sensibilité de la voie ventrale à la redondance orthographique chez les lecteurs dyslexiques afin de déterminer s'il existe chez ces derniers une spécialisation de la voie ventrale pour le traitement expert de certaines unités du langage écrit.

En résumé, nous montrons que plusieurs niveaux de spécialisation de la voie ventrale sont altérés chez les lecteurs dyslexiques. Ces altérations pourraient être liées à différents processus, sous-tendus par la voie dorsale, qui sont détaillés dans les sections suivantes.

## **II. Influence du traitement phonologique sur le traitement expert de l'écrit**

### **1. Les déficits phonologiques observés au niveau comportemental**

Les résultats de nos études mettent en évidence des troubles phonologiques spécifiques aux sujets dyslexiques. Ces déficits concernent, comme cela a déjà été décrit dans la littérature (Ziegler et al., 2008), les deux voies d'accès au lexique. Les sujets dyslexiques présentent tout d'abord des latences de dénominations ralenties par rapport aux lecteurs experts (études 1, 2, 3 et 5). Ce déficit est observé quel que soit le matériel considéré (i.e., dénomination d'images, de chiffres et de couleurs). Un déficit de dénomination est classiquement rattaché à la dyslexie développementale (Snowling, 2000; Vellutino et al., 1995) et a été interprété comme une altération de l'accès au lexique phonologique (Ziegler et al., 2008).

Les données des études 1, 2 et 3 mettent également en évidence une difficulté marquée des sujets dyslexiques à traiter les pseudomots. Bien que les latences de réponses et le taux d'erreurs des sujets contrôles soient également accrus pour les pseudomots par rapport aux autres catégories de stimuli écrits, cet effet est beaucoup plus massif chez les sujets dyslexiques. Ce ralentissement du traitement des pseudomots est observé quel que soit le format de présentation des stimuli écrits. Un trouble majeur de l'analyse des pseudomots est classiquement rapporté dans la dyslexie (Rack et al., 1992; Sprenger-Charolles et al., 2000) et interprété comme la conséquence d'une altération de la conversion des codes orthographiques en codes phonologiques. Ce processus est à la base du décodage sériel des stimuli écrits.

Nous observons donc chez les sujets dyslexiques des déficits phonologiques ayant pu compromettre les deux procédures d'analyse des stimuli écrits: le traitement en parallèle (i.e., déficits de dénomination rapide) et le traitement sériel (i.e., difficultés d'analyse des pseudomots). Nos données montrent également que ces déficits phonologiques sont absents

dans un groupe de sujets mauvais lecteurs. Les déficits phonologiques apparaissent donc comme une spécificité de la dyslexie. Ce résultat suggère en outre que certains troubles de la lecture n'auraient pas une origine phonologique et pourraient dépendre d'autres facteurs.

## **2. Un accès aux représentations phonologiques préservé chez les lecteurs dyslexiques?**

Nos données ne permettent pas d'identifier le marqueur électrophysiologique des troubles phonologiques observés chez les sujets dyslexiques au niveau comportemental. Dans les études 1 et 2, les sujets dyslexiques présentent, comme les sujets contrôles et mauvais lecteurs, de plus larges amplitudes du composant N200 pour les pseudomots que pour les mots au niveau des sites occipito-pariétaux pour les deux formats de présentation. Ces données peuvent être interprétées comme une préservation de l'activation automatique des représentations phonologiques lors du décodage des stimuli écrits. Des travaux ont déjà montré une préservation de l'activation précoce des représentations phonologiques chez des adultes dyslexiques lors de la réalisation de tâches de jugement de rime entre deux pseudomots (Savill & Thierry, 2011a) ou de décision sémantique phonologique (Savill & Thierry, 2011b; Savill & Thierry, 2012).

Il a récemment été proposé que les déficits phonologiques des lecteurs dyslexiques concernent l'accès aux représentations phonologiques (Ramus & Szenkovitz, 2008) et notamment les connexions entre les représentations orthographiques et les représentations phonologiques (Wimmer & Schurz, 2010). Il a néanmoins été suggéré que le déficit d'accès aux représentations phonologiques concernerait essentiellement des situations complexes impliquant des contraintes de vitesse ou coûteuses en mémoire à court terme (Ramus & Szenkovitz, 2008). Banai et Ahissar (2006) ont également montré que les déficits de jugements phonologiques de stimuli verbaux et non verbaux auditifs se manifestent

uniquement lors de tâches particulièrement complexes. On peut donc faire l'hypothèse que la tâche de décision lexicale employée dans nos expériences ne correspond pas aux situations permettant de mettre en évidence un déficit d'accès aux représentations phonologiques chez les lecteurs dyslexiques. Notre tâche n'impliquait en outre pas de traitement phonologique explicite. Il est possible que l'activation implicite des représentations phonologiques soit préservée chez les adultes dyslexiques. Les déficits pourraient se limiter aux situations les plus complexes ainsi qu'aux situations nécessitant de manipuler explicitement les unités phonologiques. Il est également important de rappeler que les sujets dyslexiques ayant participé à nos études étaient tous des adultes ayant bénéficié d'une longue remédiation de lecture auprès d'un orthophoniste. En France, ces remédiations sont fortement centrées sur la manipulation des unités phonologiques. Il est donc possible que ce contexte de sur-entraînement phonologique rende possible un accès aux représentations phonologiques dans certaines situations.

L'observation de déficits de dénomination et de traitement des pseudomots présents chez les sujets dyslexiques au niveau comportemental suggère des altérations au niveau d'autres étapes de traitement phonologique, non mesurées dans nos études. Des travaux ont ainsi montré une absence d'effets de similarité phonologique sur le composant P600 chez des adultes dyslexiques (Savill & Thierry, 2011a). Ceci pourrait traduire une altération de l'intégration et de la maintenance des informations phonologiques.

### **3. Impact des déficits phonologiques sur la spécialisation de la voie ventrale pour le traitement expert de l'écrit**

Nos données mettent en évidence deux grandes spécificités des sujets dyslexiques: un défaut du traitement expert des lettres et des déficits phonologiques. De plus, les données des sujets mauvais lecteurs permettent d'associer le déficit de spécialisation de la voie ventrale

pour le traitement de l'écrit non pas au niveau de lecture mais aux compétences phonologiques. A partir de ces résultats, on peut faire l'hypothèse que l'absence de traitement expert de l'écrit observée chez les sujets dyslexiques soit au moins en partie une conséquence de leurs déficits phonologiques. Il est possible que le recyclage neuronal du gyrus fusiforme gauche pour le traitement de l'écrit n'ait pas pu se développer chez les lecteurs dyslexiques en raison d'un défaut d'intégration de la forme visuelle des lettres à leur forme sonore.

Nos résultats entrent en faveur de l'hypothèse du mapping phonologique (Maurer & McCandliss, 2007; McCandliss & Noble, 2003). Cette théorie postule que la spécialisation graduelle du gyrus fusiforme gauche pour le traitement expert de l'écrit est possible grâce à l'acquisition des associations lettres-sons. L'impact de la conversion graphèmes-phonèmes sur l'apprentissage de la lecture est par ailleurs particulièrement souligné dans les modèles d'acquisition de la lecture (Doignon-Camus & Zagar, in press; Grainger & Ziegler, 2011; Harm & Seidenberg, 2004; Seidenberg & McClelland, 1989; Ziegler & Goswami, 2005). Jusqu'à présent, les arguments soutenant la théorie du mapping phonologique provenaient essentiellement de données recueillies chez des enfants dyslexiques en IRMf. Une étude a ainsi montré des corrélations entre l'activité du gyrus fusiforme gauche et les habiletés phonologiques (Shaywitz et al., 2002). D'autres travaux ont décrit une altération de la connexion entre le cortex occipito-temporal gauche et le cortex pariétal inférieur gauche (Horwitz et al., 1998; Pugh et al., 2000b; Van der Mark et al., 2011). Le degré de connexion entre ces deux structures cérébrales était en outre corrélé avec les compétences phonologiques des participants (Van der Mark et al., 2011). Ces études établissent des liens entre les compétences phonologiques et l'activation du gyrus fusiforme gauche ou ses connexions avec d'autres structures mais n'apportent pas d'informations précises sur l'impact des habiletés phonologiques sur la spécialisation de la voie ventrale pour le traitement de l'écrit. Nos résultats permettent d'établir une association entre des déficits phonologiques (i.e., l'accès au

lexique phonologique et les associations lettres-sons) et le traitement expert de l'écrit au niveau de la voie ventrale.

Il serait important de déterminer si le traitement expert de l'écrit peut être rétabli chez les lecteurs dyslexiques dans certaines conditions. Des données de la littérature ont montré une spécialisation du composant N170 chez des prélecteurs ainsi que chez des adultes apprenant un langage artificiel (Brem et al., 2010; Yoncheva et al., 2010). Dans les deux cas, les sujets ont suivi un entraînement aux associations lettres-sons. Il serait intéressant d'étudier l'impact de tels entraînements sur la spécialisation du composant N170 chez des lecteurs dyslexiques. On peut faire l'hypothèse qu'un traitement expert des lettres puisse être rétabli chez ces individus suite à une remédiation phonologique appropriée. De tels résultats permettraient de déterminer les conditions optimales d'apprentissage de la lecture dans la dyslexie.

Enfin, il est important de remarquer qu'en dépit de compétences phonologiques intactes, on observe chez les mauvais lecteurs, comme chez les sujets dyslexiques, une absence d'effets de lexicalité et de fréquence lexicale sur l'amplitude du composant N170 (expérience 3). Ce résultat peut être interprété comme un défaut de traitement expert des mots familiers au niveau de la voie ventrale. On peut faire l'hypothèse que certains niveaux de spécialisation du gyrus fusiforme gauche, décrits dans le modèle LCD (Dehaene et al., 2005), sont plus influencés que d'autres par le décodage phonologique. Le traitement expert des lettres pourrait particulièrement dépendre des associations entre la forme visuelle des lettres et leur forme sonore au moment de l'apprentissage de la lecture. D'autres facteurs, telle que l'influence de l'attention visuo-spatiale, pourraient également être impliqués et sont détaillés dans la section suivante.

### **III. Influence de l'attention visuo-spatiale sur le traitement expert de l'écrit**

Les résultats de ce projet de recherche apportent des informations concernant les altérations de l'attention visuo-spatiale chez des adultes dyslexiques ainsi que l'influence possible de tels déficits sur la reconnaissance visuelle des mots, qu'il s'agisse de situations de traitement en parallèle ou de traitement sériel (étude 4). Nous avons étudié à travers l'expérience 5 les deux processus attentionnels décrits par Laberge et Brown (1989) qui seraient impliqués lors de l'analyse des stimuli écrits: l'orientation de l'attention vers une cible, ainsi que l'inhibition des stimuli adjacents à cette cible. Les sections suivantes discutent des résultats obtenus pour ces deux opérations cognitives ainsi que de leur influence potentielle sur le déficit de lecture des sujets dyslexiques.

#### **1. L'orientation de l'attention vers la cible à traiter**

L'expérience 5 apporte tout d'abord des informations concernant le déficit d'orientation attentionnelle chez les lecteurs dyslexiques. Contrairement aux sujets normolecteurs, l'amplitude du composant N100 est similaire pour les essais congruents et non-congruents chez les sujets dyslexiques. L'orientation précoce de l'attention vers les stimuli pertinents à traiter dans le champ visuel ne serait donc pas modulée en fonction du type de flanker chez ces sujets. Ce résultat est compatible avec les nombreuses observations d'un déficit du déplacement rapide de l'attention chez les lecteurs dyslexiques à partir d'études comportementales (Dispaldro et al., 2012; Facoetti et al., 2008; Hari & Renvall, 2001) et électrophysiologiques (Wimmer et al., 2002). Le ralentissement du déplacement attentionnel est en outre habituellement décrit chez des sujets dyslexiques caractérisés par des déficits phonologiques (Facoetti et al., 2006, 2010; Roach & Hogben, 2007; Ruffino et al., 2010), ce qui était le cas des sujets de nos études.

Nos résultats montrent aussi que ce trouble d'orientation attentionnelle n'est pas spécifique aux sujets dyslexiques mais qu'il est commun aux individus ayant un faible niveau de lecture. Il a été montré que les capacités d'orientation attentionnelle, mesurées chez des prélecteurs, sont prédictives des capacités ultérieures de lecture (Franceschini et al., 2012). Il est important de rappeler que l'orientation de l'attention a été étudiée dans l'expérience 5 à partir d'un matériel non langagier. Ce déficit attentionnel ne peut donc pas être considéré comme une conséquence d'une difficulté à traiter les caractères écrits chez les sujets dyslexiques et mauvais lecteurs. De bonnes capacités d'orientation de l'attention apparaissent donc plutôt comme un pré-requis à l'acquisition d'un niveau de lecture expert. Une altération de ce processus pourrait en effet compromettre l'identification des mots ou des unités sublexicales à traiter (Laberge & Samuels, 1989). De nombreux travaux ont montré que la façon dont l'attention s'oriente sur les mots a un impact sur leur identification. Des études comportementales ont ainsi mis en évidence un effet d'indigence sur l'identification des lettres (Marzouki et al., 2007) ou des mots (Auclair & Siéoff, 2002; Lien et al., 2010; McCann et al., 1992; Ortells et al., 1998). Des effets d'indigence ou d'amorçage ont également été rapportés sur l'amplitude du composant N170, qui est plus négative en réponse à des mots suite à un indice spatial (McCarthy & Nobre, 1993), une amorce de catégorie (Aranda et al., 2010), ou une amorce du type de traitement à réaliser (Ruz & Nobre, 2008). Ces travaux montrent une influence particulièrement précoce de l'orientation attentionnelle sur le traitement des stimuli écrits, opérant bien avant l'accès au lexique. Une orientation rapide de l'attention vers les stimuli pertinents permet en effet une sélection de ces stimuli qui vont ensuite être analysés de façon plus approfondie au niveau de la voie ventrale.

Une altération de l'orientation attentionnelle pourrait donc être en partie responsable de la difficulté d'accès rapide au lexique observée dans les études 1 et 2 pour le format horizontal chez les sujets dyslexiques et chez les mauvais lecteurs. Nous pouvons faire l'hypothèse que

l'altération du traitement en parallèle des mots est liée à un défaut de spécialisation de la voie ventrale pour le traitement expert des mots familiers mais aussi à une difficulté d'orientation rapide de l'attention pour identifier le mot à traiter.

Les études 1 et 2 rapportent également une difficulté à traiter rapidement les lettres/groupes de lettres pour le format vertical chez les sujets dyslexiques et de façon plus réduite chez les mauvais lecteurs (i.e., effet de lexicalité au niveau de la voie ventrale). Il est possible que ce déficit soit en partie consécutif à une altération de l'orientation de l'attention, induisant une difficulté à identifier les unités sublexicales des séquences de lettres (Laberge & Brown, 1989). Les sujets dyslexiques présentent un effet de lexicalité plus marqué que les mauvais lecteurs. Ceci pourrait traduire une difficulté accrue à traiter rapidement les lettres/groupes de lettres chez les lecteurs dyslexiques. Chez ces derniers, le traitement des unités sublexicales a pu être compromis non seulement par un défaut de segmentation des séquences de lettres par l'attention mais aussi par leurs déficits de conversion lettres-sons. Il semblerait même que les déficits phonologiques des lecteurs dyslexiques puissent être en partie reliés à l'orientation de l'attention. Il a récemment été montré en ERP que des adultes dyslexiques présentent une absence de modulation de l'amplitude du composant P3a en réponse à des stimuli écrits déviants phonologiquement, traduisant un déficit d'orientation de l'attention vers ces stimuli (Savill & Thierry, 2011b; Savill & Thierry, 2012). Ceci a été interprété comme une altération de l'orientation de l'attention vers les correspondances lettres-sons ou vers les unités phonologiques pertinentes à analyser. Il a par ailleurs été suggéré qu'un ralentissement du déplacement attentionnel puisse altérer la segmentation des séquences de lettres en groupes de lettres et entraver le traitement expert des lettres mais aussi le décodage phonologique (Facoetti et al., 2006; Facoetti et al., 2008; Vidyasagar & Pammer, 2010). L'influence de l'orientation de l'attention sur l'acquisition des associations lettres-sons devrait être précisée dans les futures recherches. Ceci permettrait de mieux comprendre les

influences respectives des déficits phonologiques et attentionnels des lecteurs dyslexiques sur leur défaut de traitement expert de l'écrit.

Il est néanmoins important de remarquer que l'altération de l'expertise pour le traitement des lettres observée chez les sujets dyslexiques (étude 3) pourrait aussi expliquer pourquoi un ralentissement du déplacement attentionnel n'a pu être observé que dans ce groupe et pas chez les mauvais lecteurs pour le format vertical dans les études 1 et 2. Nos données suggèrent donc des influences réciproques entre l'orientation attentionnelle et la reconnaissance visuelle des mots.

En résumé, nos études mettent en évidence qu'une altération de l'orientation de l'attention pourrait être une caractéristique des individus présentant un faible niveau de lecture. L'expérience 5 met également en évidence un déficit attentionnel spécifique aux sujets dyslexiques: la détection du conflit.

## **2. La détection du conflit: un déficit spécifique aux lecteurs dyslexiques**

Les résultats de l'étude 5 apportent aussi des informations sur une autre étape sollicitée par la tâche de flanker: la détection du conflit. Les sujets dyslexiques sont le seul groupe à ne pas présenter une augmentation de l'amplitude du composant N200 pour les essais non-congruents par rapport aux essais congruents. Un déficit de détection de la présence d'un conflit entre les informations apportées par la cible et les distracteurs est donc spécifique aux sujets dyslexiques. Ce résultat, considéré avec le déficit d'orientation de l'attention, également observé chez les sujets dyslexiques, soutient l'idée proposée d'une altération du traitement visuo-attentionnel précoce dans la dyslexie (Dhar et al., 2008).

L'impact potentiel d'un déficit de détection du conflit sur la reconnaissance visuelle des mots reste à établir. La compréhension de ce lien est d'autant plus importante que le déficit de détection du conflit est spécifique aux sujets dyslexiques. On peut à cet égard envisager que

les lecteurs dyslexiques aient des difficultés à départager rapidement les informations apportées par les cibles à traiter des informations apportées par les stimuli adjacents. Ceci pourrait avoir un impact négatif sur l'identification des mots et des unités sublexicales à traiter lors de la reconnaissance visuelle des mots.

### **3. L'inhibition des stimuli adjacents**

L'expérience 5 ne permet pas de mettre en évidence une altération de l'inhibition (i.e., composant Nogo P3) ni de l'allocation des ressources attentionnelles (i.e., composant P3b) chez les sujets dyslexiques et chez les sujets mauvais lecteurs. Nos trois groupes de sujets présentent en effet une augmentation des amplitudes du composant Nogo P3 et une réduction des amplitudes du composant P3b pour les essais non-congruents par rapport aux essais congruents. Il semblerait donc que les déficits d'attention visuo-spatiale des individus présentant un faible niveau de lecture se limitent à l'orientation attentionnelle. La difficulté à sélectionner le mot cible ou les unités sublexicales à traiter serait donc liée à un défaut de facilitation du traitement de la cible (i.e., un déficit d'orientation de l'attention) et ne serait pas attribuable à un défaut d'inhibition des informations adjacentes qui entourent la cible.

Ce résultat peut paraître étonnant, compte tenu des déficits d'inhibition des distracteurs rapportés chez des enfants (Vidyasagar & Pammer, 1999) et chez des adultes dyslexiques (Bucholz & McKone, 2004; Iles et al., 2000). Certains travaux ont également montré une sensibilité marquée des sujets dyslexiques au masquage latéral (Bouma & Legein, 1977; Callens et al., 2013). Il est à cet égard important de rappeler que ces déficits ont été rapportés à partir de données comportementales. Il est donc possible que ces troubles ne soient pas liés à une altération de l'inhibition des distracteurs mais à une difficulté à orienter son attention vers le stimulus cible à rapporter. Il est par ailleurs possible que le déficit d'inhibition ne touche qu'une sous-catégorie de sujets dyslexiques. Des différences au niveau du composant Nogo

P3 ont en effet été décrites chez des sujets dyslexiques ayant une histoire de déficit d'attention avec hyperactivité ou présentant certains déficits comportementaux (Dhar et al., 2010; Duncan et al., 1994). Aucun des sujets ayant participé à nos études ne présentait ce type de trouble, ce qui pourrait expliquer la raison pour laquelle nous n'avons pas observé de déficit d'inhibition chez les sujets dyslexiques.

Enfin, les résultats de l'étude 5 n'ont pas mis en évidence d'asymétrie au niveau des différents processus attentionnels étudiés. Des résultats de la littérature ont pourtant montré chez les lecteurs dyslexiques une sur-distractibilité par rapport aux informations présentées au niveau du champ visuel droit, interprété comme une difficulté à inhiber les informations se situant à droite du stimulus à traiter (Hari & Koivikko, 1999). Nos résultats peuvent s'expliquer par notre design expérimental: la présentation de la cible et des distracteurs dans le même champ visuel et la longue durée de présentation des items. Il est possible qu'un déficit d'inhibition se manifeste uniquement dans des conditions de durées de présentation réduites des stimuli et lorsque les sujets dyslexiques doivent traiter une cible entourée de distracteurs qui n'apparaissent pas dans le même champ visuel. Nous pouvons donc faire l'hypothèse qu'en modifiant notre design expérimental, une asymétrie de l'inhibition des distracteurs puisse être mise en évidence. Il serait nécessaire d'étudier cet aspect afin de déterminer sa possible contribution aux déficits de traitement des stimuli écrits des lecteurs dyslexiques.

En résumé, les résultats de nos études montrent un déficit d'orientation de l'attention commun aux individus présentant un faible niveau de lecture et une altération de détection du conflit spécifique aux sujets dyslexiques. Dans l'ensemble, nos données apportent des précisions concernant la nature des déficits phonologiques et attentionnels des lecteurs dyslexiques. Nos expériences proposent en outre des hypothèses sur les influences possibles

de ces troubles sur le traitement expert de l'écrit au niveau de la voie ventrale. La dernière section fait le point sur les implications de nos résultats sur les connaissances actuelles concernant la dyslexie développementale et les modèles de lecture.

## **IV. Implication de nos résultats et perspectives**

### **1. La dyslexie développementale**

Les données de ce projet de recherche apportent des informations concernant l'implication des voies ventrale et dorsale lors de la reconnaissance visuelle des mots chez des adultes dyslexiques. Nos études mettent tout d'abord en évidence des altérations de deux niveaux de spécialisation de la voie ventrale (i.e., le traitement expert des lettres et des mots familiers) décrits dans le modèle LCD (Dehaene et al., 2005). Nous montrons surtout qu'une absence de spécialisation du composant N170 pour le traitement expert de l'écrit peut être considérée comme un corrélat électrophysiologique spécifiquement rattaché à la dyslexie développementale.

Les données obtenues au niveau de la voie dorsale apportent des informations en rapport aux deux théories principales de la dyslexie: la théorie du déficit phonologique et la théorie du déficit attentionnel. Nous montrons ainsi qu'une activation rapide des représentations phonologiques est possible dans certaines conditions chez des adultes dyslexiques caractérisés par des déficits phonologiques. Ces déficits phonologiques pourraient par ailleurs être impliqués dans le défaut de traitement expert de l'écrit des lecteurs dyslexiques. L'absence de spécialisation du composant N170 pour l'écrit et les déficits phonologiques observés uniquement dans notre groupe de sujets dyslexiques soutient ainsi fortement le rôle majeur de l'acquisition des associations lettres-sons pour l'émergence d'un traitement expert de l'écrit. Nous observons également que sur deux processus de l'attention visuo-spatiale qui sont impliqués lors du traitement des stimuli écrits (i.e., l'orientation de l'attention et l'inhibition; Laberge & Brown, 1989), seule l'orientation de l'attention semble altérée chez les lecteurs dyslexiques. Un défaut d'orientation de l'attention vers les cibles à traiter pourrait jouer un rôle majeur pour l'acquisition d'un niveau de lecture expert, puisque ce déficit est observé

chez les sujets dyslexiques et chez les mauvais lecteurs. Ce trouble attentionnel pourrait être particulièrement impliqué dans la spécialisation de la voie ventrale pour la reconnaissance des mots familiers, un déficit commun à ces deux groupes de sujets.

Déterminer les influences respectives des déficits phonologiques et attentionnels sur la spécialisation de la voie ventrale semble primordial dans l'étude de la dyslexie. Outre l'étude de l'impact de remédiations phonologiques, l'influence de l'apprentissage des associations lettres-sons sur la spécialisation du composant N170 pourrait également être étudiée en comparant des sujets dont la langue maternelle diffère au niveau de la transparence orthographique. On peut faire l'hypothèse d'une spécialisation plus précoce au cours de l'apprentissage de la lecture ou plus marquée chez les individus ayant bénéficié de l'exposition à une orthographe transparente, impliquant davantage de décodage phonologique (Ziegler & Goswami, 2005), par rapport à ceux ayant juste été exposés à une orthographe opaque. Enfin, comme les déficits phonologiques des lecteurs dyslexiques pourraient être en partie reliés à l'orientation de l'attention (Savill & Thierry, 2011b; 2012), l'influence de ce processus attentionnel sur l'acquisition des associations lettres-sons devrait être précisée dans les futures recherches.

## **2. Caractérisation des lecteurs dyslexiques et des mauvais lecteurs**

Dans ce projet de recherche, nous avons comparé des adultes dyslexiques à des sujets contrôles appariés sur l'âge (i.e., des lecteurs experts) et des sujets contrôles appariés sur le niveau de lecture (i.e., des mauvais lecteurs). Nous avons ainsi été en mesure de caractériser certaines des spécificités des lecteurs dyslexiques et des individus présentant un faible niveau de lecture. Trois déficits apparaissent comme étant spécifiquement rattachés à la dyslexie: 1) un défaut de spécialisation de la voie ventrale pour le traitement expert des lettres (composant N170 dans l'étude 3); 2) des déficits phonologiques observés au niveau comportemental

(déficits de dénomination dans l'ensemble des études et du traitement des pseudomots dans les études 1, 2 et 3); 3) une altération de la détection d'un conflit entre les informations apportées par un stimulus cible et des stimuli adjacents (composant N200 dans l'étude 5). Le lien entre les déficits phonologiques des lecteurs dyslexiques et l'absence de traitement expert de l'écrit est établi à travers la théorie du mapping phonologique (Maurer & McCandliss, 2007; McCandliss & Noble, 2003). Le déficit de détection du conflit observé spécifiquement chez les sujets dyslexiques pourrait refléter une difficulté à départager les informations apportées par un stimulus cible et les informations véhiculées par les stimuli adjacents. Cela pourrait rendre particulièrement difficile l'identification des lettres ou des groupes de lettres à traiter. L'implication précise du défaut de détection du conflit sur les troubles de reconnaissance visuelle des mots des lecteurs dyslexiques reste encore à préciser.

Bien que cela n'ait pas été l'objectif principal de ce projet de recherche, nos données apportent également des informations sur les caractéristiques des adultes présentant un faible niveau de lecture sans avoir d'histoire personnelle ou familiale de dyslexie. Il est intéressant de remarquer que malgré des niveaux de lecture similaires au test de l'Alouette, l'ensemble des processus cognitifs déficitaires ne sont pas les mêmes entre les deux groupes de sujets. Nos résultats révèlent néanmoins deux déficits communs aux sujets dyslexiques et aux sujets mauvais lecteurs: 1) un déficit du niveau le plus approfondi de spécialisation de la voie ventrale (i.e., le traitement expert des mots familiers dans l'étude 3); 2) des troubles d'orientation de l'attention (expérience 5). Nos études n'ont en revanche pas pu mettre en évidence de déficit spécifique aux mauvais lecteurs.

### **3. Perspectives développementales**

Nos résultats montrent un défaut du traitement expert de l'écrit à travers la spécialisation du composant N170 chez des adultes dyslexiques. Cette altération pourrait avoir une origine phonologique (i.e., un trouble d'acquisition des associations lettres-sons) et/ou visuo-attentionnelle (i.e., un déficit d'identification des lettres à traiter). Une façon de déterminer quel(s) facteur(s) a (ont) compromis la reconnaissance des stimuli écrits chez les lecteurs dyslexiques serait de mettre en place des études longitudinales chez des enfants. Les travaux longitudinaux de Maurer et collaborateurs (Maurer et al., 2007; Maurer et al., 2010; Maurer et al., 2013) apportent des informations sur la spécialisation de la voie ventrale pour le traitement expert de l'écrit chez des enfants normolecteurs et chez des enfants dyslexiques. Il serait également important d'obtenir des données sur la mise en place des interactions entre les voies ventrale et dorsale. On peut par exemple envisager de comparer, comme nous l'avons fait chez des adultes dans les expériences 1 et 2, les procédures d'analyse en parallèle et d'analyse sérielle en manipulant le format de présentation des stimuli écrits. Une comparaison entre des enfants normolecteurs et des enfants dyslexiques évalués à différents moments précédant et suivant l'apprentissage de la lecture permettrait de comprendre la mise en place d'un traitement spécialisé de l'écrit chez les normolecteurs et à quel moment surviennent les altérations chez les enfants dyslexiques. On peut également envisager de suivre à long terme l'impact de remédiations focalisées sur l'acquisition des correspondances lettres-sons ou l'identification attentionnelle des unités sublexicales du langage écrit sur la spécialisation du composant N170. Les données de telles études permettraient d'identifier les conditions optimales d'apprentissage de la lecture dans la dyslexie. Compte tenu de nos résultats, on peut faire l'hypothèse qu'une altération de l'identification des lettres par

l'attention et de l'apprentissage des associations lettres-sons aient conjointement compromis la mise en place d'un traitement expert des caractères écrits au niveau de la voie ventrale.

#### **4. Les modèles de reconnaissance visuelle des mots**

Les données de ce projet de recherche apportent des informations sur les opérations cognitives impliquées lors de la reconnaissance visuelle des mots et peuvent donc être intéressantes relativement aux modèles d'apprentissage de la lecture ainsi qu'aux modèles de lecture experte. L'analyse en parallèle et l'analyse sérielle des séquences de lettres ont été décrites dans les modèles sous la forme de deux voies d'accès au lexique (Coltheart et al., 2001; McClelland & Rumelhart, 1981; Perry et al., 2007) ou de deux procédures de traitement des stimuli écrits (Ans et al., 1998).

La double distinction de nos groupes de sujets dyslexiques et mauvais lecteurs concernant la spécialisation de la N170 pour le traitement de l'écrit et les habiletés phonologiques apporte un nouvel argument en faveur de l'importance de l'acquisition des correspondances lettres-sons sur l'apprentissage de la lecture (Doignon-Camus & Zagar, 2009; Grainger & Ziegler, 2011; Harm & Seidenberg, 2004; Seidenberg & McClelland, 1989; Ziegler & Goswami, 2005). En revanche, très peu de modèles décrivent l'implication de l'attention visuo-spatiale lors de la reconnaissance visuelle des mots. Dans le modèle de Laberge et Samuels (1974), un centre attentionnel permettrait d'activer les représentations de lettres ainsi que leur représentation phonologique lors de la période d'apprentissage de la lecture. Laberge et Brown (1989) ont décrit deux processus attentionnels impliqués dans la reconnaissance visuelle des mots: l'orientation de l'attention et l'inhibition. Enfin, le modèle MTM d'Ans et collaborateurs (1998) décrit une fenêtre visuo-attentionnelle, dont l'ajustement détermine la procédure de traitement des stimuli écrits (i.e., la procédure globale ou la procédure analytique) et ce chez le lecteur débutant et expérimenté. Le déficit d'orientation

attentionnelle que nous observons chez les individus présentant un faible niveau de lecture souligne l'importance de cette opération cognitive lors du traitement des stimuli écrits. De bonnes habiletés d'orientation visuo-spatiale pourraient être un pré-requis à l'acquisition d'un niveau de lecture expert. Nous suggérons que les modèles d'apprentissage de la lecture et de lecture experte devraient tenir compte de ce processus en intégrant un niveau attentionnel opérant avant la toute première étape de traitement visuel des lettres. Ce niveau aurait pour fonction une orientation rapide de l'attention vers les unités sublexicales ou lexicales à traiter.

La considération des capacités d'intégration lettres-sons et d'orientation attentionnelle dans les modèles de reconnaissance visuelle des mots permettrait de rendre compte des résultats distincts observés chez les sujets dyslexiques et chez les mauvais lecteurs dans nos études. Il semblerait que des déficits phonologiques et attentionnels soient impliqués dans les troubles de lecture des sujets dyslexiques alors que seul un déficit d'orientation de l'attention semble compromettre un traitement rapide des stimuli écrits chez les mauvais lecteurs.

## Conclusion générale

L'objectif de ce projet de recherche était d'étudier l'implication des voies ventrale et dorsale lors de la reconnaissance visuelle des mots chez des adultes dyslexiques. La comparaison de sujets dyslexiques à un groupe de sujets contrôles appariés sur l'âge (i.e., des lecteurs experts) et un groupe de sujets contrôles appariés sur le niveau de lecture (i.e., des mauvais lecteurs) nous a permis d'isoler les spécificités de la dyslexie.

Nos résultats apportent tout d'abord des informations sur le traitement du langage écrit au niveau de la voie ventrale chez des adultes dyslexiques. Le modèle LCD (Dehaene et al., 2005) décrit différents niveaux de spécialisation de la voie ventrale. Les régions postérieures sous-tendent la reconnaissance experte des lettres tandis que des associations de lettres de plus en plus complexes sont reconnues plus antérieurement. Nos données montrent qu'une altération du niveau de spécialisation le plus complexe de la voie ventrale (i.e., la reconnaissance des mots familiers) est une caractéristique des individus pour lesquels l'exposition à l'écrit n'a pas abouti à l'acquisition d'un niveau de lecture expert. Nos résultats montrent surtout qu'une absence de traitement expert des lettres est une caractéristique propre à la dyslexie. Il serait à présent important de déterminer s'il existe chez les lecteurs dyslexiques une spécialisation de la voie ventrale pour certaines unités du langage écrit (e.g., un traitement expert des bigrammes fréquents).

Nous avons également étudié des processus phonologiques et attentionnels, sous-tendus par la voie dorsale, qui ont pu contribuer aux déficits de spécialisation de la voie ventrale observés chez les lecteurs dyslexiques. Concernant les processus phonologiques, nous observons des déficits au niveau comportemental spécifiques aux sujets dyslexiques. Ces déficits phonologiques peuvent avoir en partie compromis la spécialisation de la voie ventrale pour le traitement expert de l'écrit chez les lecteurs dyslexiques, de façon concordante avec

l'hypothèse du mapping phonologique (Maurer & McCandliss, 2007; McCandliss & Noble, 2003). Nos résultats ne permettent en revanche pas de déterminer quelle étape de traitement phonologique est altérée chez les lecteurs dyslexiques. Nous pouvons seulement confirmer les travaux de Savill et Thierry (2011a; 2011b; 2012), selon lesquels l'étape précoce d'activation des représentations phonologiques est préservée. Cet aspect devrait être approfondi dans les recherches futures.

Enfin, nos résultats supportent l'idée d'un rôle important de l'orientation de l'attention dans la reconnaissance visuelle des mots, comme cela a été suggéré par Laberge et Brown (1989). Un déficit d'orientation attentionnelle est en effet observable chez les lecteurs dyslexiques et chez les mauvais lecteurs. Nous montrons en outre que différents déficits attentionnels peuvent être rattachés aux différents troubles de la lecture. Alors que les mauvais lecteurs présentent un déficit isolé d'orientation de l'attention, les sujets dyslexiques manifestent également un trouble d'identification du conflit. L'implication de ce processus attentionnel dans la reconnaissance visuelle des mots reste à établir.

En résumé, ce projet de recherche apporte des informations sur la spécialisation de la voie ventrale ainsi que sur certains processus phonologiques et attentionnels sous-tendus par la voie dorsale qui pourraient influencer cette spécialisation chez les lecteurs dyslexiques adultes. La précision de ces aspects dans les recherches futures représente un enjeu majeur pour comprendre les altérations de reconnaissance visuelle des mots dans la dyslexie développementale.

## Références

- Acha, J., & Perea, M. (2008). The effects of length and transposed-letter similarity in lexical decision: evidence with beginning, intermediate, and adult readers. *The British Journal of Psychology*, *99*(2), 245-264.
- Aghababian, V., & Nazir, T.A. (2000). Developing normal reading skills: aspects of the visual processes underlying word recognition. *Journal of Experimental Child Psychology*, *76*(2), 123-150.
- Ahissar, M. (2007). Dyslexia and the anchoring-deficit hypothesis. *Trends in Cognitive Sciences*, *11*(11), 458-465.
- Ans, B., Carbonnel, S., & Valdois, S. (1998). A connectionist multi-trace memory model for polysyllabic word reading. *Psychological Review*, *105*(4), 678-723.
- Aranda, C., Madrid, E., Tudela, P., & Ruz, M. (2010). Category expectations: a differential modulation of the N170 potential for faces and words. *Neuropsychologia*, *48*(14), 4038-4045.
- Araújo, S., Bramão, I., Faísca, L., Petersson, K. M., & Reis, A. (2012). Electrophysiological correlates of impaired reading in dyslexic pre-adolescent children. *Brain & Cognition*, *79*(2), 79-88.
- Ashby, J. (2010). Phonology is fundamental in skilled reading: Evidence from ERPs. *Psychonomic Bulletin & Review* *17*(1), 95-100.
- Auclair, L., & Siéoff, E. (2002). Attentional cueing effect in the identification of words and pseudowords of different length. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *55*(2), 445-463.
- Backman, J. E., Mamen, M., & Ferguson, H. B. (1984). Reading-level design: Conceptual and methodological issues in reading research. *Psychological Bulletin*, *96*(3), 560-568.

- Banai, K., & Ahissar, M. (2006). Auditory processing deficits in dyslexia: task or stimulus related? *Cerebral Cortex*, *16*(12), 1718-1728.
- Bar, M., Kassam, K. S., Ghuman, A. S., Boshyan, J., Schmidt, A. M., Dale, A. M., Hämäläinen, M. S., Marinkovic, K., Schacter, D. L., Rosen, B. R., & Halgren, E. (2006). Top-down facilitation of visual recognition. *PNAS*, *103*(2), 449-454.
- Barber, H., Vergara, M., & Carreiras, M. (2004). Syllable frequency effects in visual word recognition: evidence from ERPs. *Neuroreport*, *15*(3), 545-548.
- Bednarek, D. B., Saldaña, D., Quintero-Gallego, E., Garcia, I., Grabowska, A., & Gómez, C. M. (2004). Attentional deficit in dyslexia: a general or specific impairment? *Neuroreport*, *15*(11), 1787-90.
- Bentin, S., Mouchetant-Rostaing, Y., Giard, M. H., Echallier, J. F., & Pernier, J. (1999). ERP manifestations of processing printed words at different psycholinguistic levels: time course and scalp distribution. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *11*(3), 235-260.
- Bijeljac-Babic, R., Millogo, V., Farioli, F., & Grainger, J. (2004). A developmental investigation of word length effects in reading using a new on-line word identification paradigm. *Reading & Writing: An Interdisciplinary Journal*, *17*(4), 411-431.
- Binder, J. R., McKiernan, K. A., Parsons, M. E., Westbury, C. F., Possing, E.T., Kaufman, J. N., & Buchanan, L. (2003). Neural correlates of lexical access during visual word recognition. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *15*(3), 372-393.
- Binder, J. R., Medler, D. A., Westbury, C. F., Liebenthal, E., & Buchanan, L. (2006). Tuning of the human left fusiform gyrus to sublexical orthographic structure. *NeuroImage*, *33*(2), 739-748.
- Binder, J. R., & Mohr, J. P. (1992). The topography of callosal reading pathways. A case-control analysis. *Brain*, *115*(6), 1807-1826.
- Blau, V., van Atteveldt, N., Ekkebus, M., Goebel, R., & Blomert, L. (2009). Reduced neural

- integration of letters and speech sounds links phonological and reading deficits in adult dyslexia. *Current Biology*, *19*(6), 503-508.
- Bolger, D. J., Perfetti, C. A., & Schneider, W. (2005). Cross-cultural effect on the brain revisited: universal structures plus writing system variation. *Human Brain Mapping*, *25*(1), 92-104.
- Booth, J. R., Burman, D. D., Van Santen, F. W., Harasaki, Y., Gitelman, D. R., Parrish, T. B., & Mesulam, M. M. (2001). The development of specialized brain systems and oral-language. *Child Neuropsychology: A Journal on Normal and Abnormal Development in Childhood and Adolescence*, *7*(3), 119-141.
- Bosse, M. L., Tainturier, M. J., & Valdois, S. (2007). Developmental dyslexia: the visual attention span deficit hypothesis. *Cognition*, *104*(2), 198-230.
- Bosse, M. L., & Valdois, S. (2009). Influence of the visual attention span on child reading performance: a cross-sectional study. *Journal of Research in Reading*, *32*(2), 230-253.
- Botvinick, M. M., Braver, T. S., Barch, D. M., Carter, C. S., & Cohen, J. D. (2001). Conflict monitoring and cognitive control. *Psychological Review*, *108*(3), 624-652.
- Bouma, H. (1970). Interaction effects in parafoveal letter recognition. *Nature*, *226*(5241), 177-178.
- Bouma, H., & Legein, C. P. (1977). Foveal and parafoveal recognition of letters and words by dyslexics and by average readers. *Neuropsychologia*, *15*(1), 69-80.
- Braet, W., & Humphreys, G. W. (2006). Case mixing and the right parietal cortex: evidence from rTMS. *Experimental Brain Research*, *168*(1-2), 265-271.
- Brem, S., Bach, S., Kucian, K., Guttorm, T. K., Martin E., Lyytinen, H., Brandeis, D., & Richardson, U. (2010). Brain sensitivity to print emerges when children learn letter-speech sound correspondences. *PNAS*, *107*(17), 7939-7944.
- Brem, S., Bucher, K., Halder, P., Summers, P., Dietrich, T., Martin, E., & Brandeis, D.

- (2006). Evidence for developmental changes in the visual word processing network beyond adolescence. *NeuroImage*, 29(3), 822-837.
- Bruck, M. (1992). Persistence of dyslexics' phonological awareness deficits. *Development Psychology*, 28(5), 874-886.
- Brunswick, N., McCrory, E., Price, C. J., Frith, C. D., & Frith, U. (1999). Explicit and implicit processing of words and pseudowords by adult developmental dyslexics: a search for Wernicke's Wortschatz? *Brain*, 122(10), 1901-1917.
- Bryant, P., & Goswami, U. (1986). Strengths and weaknesses of the reading level design: A comment on Backman, Mamen, and Ferguson. *Psychological Bulletin*, 100(1), 101-103.
- Büchel, C., Price, C., & Friston, K. (1998). A multimodal language region in the ventral visual pathway. *Nature*, 394(6690), 274-277.
- Bucholz, J., & McKone, E. (2004). Adults with dyslexia show deficits on spatial frequency doubling and visual attention tasks. *Dyslexia*, 10(1), 24-43.
- Bullier, J. (2001). Integrated model of visual processing. *Brain Research Reviews*, 36(2-3), 96-107.
- Cai, Q., Paulignan, Y., Brysbaert, M., Ibarrola, D., & Nazir, T. A. (2009). The left occipito-temporal response to words depends on language lateralization but not on visual familiarity. *Cerebral Cortex*, 20(5), 1153-1163.
- Callens, M., Whitney, C., Tops, W., & Brysbaert, M. (2013). No deficiency in left-to-right processing of words in dyslexia but evidence for enhanced visual crowding. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, in press.
- Cao, F., Bitan, T., & Booth, J. R., (2008). Effective brain connectivity in children with reading difficulties during phonological processing. *Brain & Language*, 107(2), 91-101.
- Carreiras, M., Alvarez, C., & De Vega, M. (1993). Syllable frequency and visual word recognition in Spanish. *Journal of Memory and Language*, 32(6), 766-780.

- Carreiras, M., Seghier, M. L., Baquero, S., Estévez, A., Lozano, A., Devlin, J. T., & Price, C. J. (2009). An anatomical signature for literacy. *Nature*, *461*(7266), 983-986.
- Cattinelli, I., Borghese, N. A., Galluci, M., & Paulesu, E. (2012). Reading the reading brain: a new meta-analysis of functional imaging data on reading. *Journal of Neurolinguistics*, *26*(1), 214-238.
- Chambers, C. D., Payne, J. M., Stokes, M. G., & Mattingley, J. B. (2012). Fast and slow parietal pathways mediate spatial attention. *Nature Neuroscience*, *7*(3), 217-218.
- Chan, S. T., Tang, S. W., Tang, K. W., Lee, W. K., Lo, S. S., & Kwong, K. K. (2009). Hierarchical coding of characters in the ventral and dorsal visual streams of Chinese language processing. *NeuroImage*, *48*(2), 423-435.
- Cohen, L., & Dehaene, S. (2009). Ventral and Dorsal contributions to word reading. In Gazzaniga, M., editor, *Cognitive Neuroscience*, 4<sup>th</sup> edition, MIT Press.
- Cohen, L., Dehaene, S., Naccache, L., Lehéricy, S., Dehaene-Lambertz, G., Hénaff, M.-A., & Michel, F. (2000). The visual word form area: spatial and temporal characterization of an initial stage of reading in normal subjects and posterior split-brain patients. *Brain*, *123*(2), 291-307.
- Cohen, L., Dehaene, S., Vinckier, F., Jobert, A., & Montavont, A. (2008). Reading normal and degraded words: contribution of the dorsal and ventral visual pathways. *NeuroImage*, *40*(1), 353-366.
- Cohen, L., Lehéricy, S., Chochon, F., Lemer, C., Rivaud, S., & Dehaene, S. (2002). Language-specific tuning of visual cortex? Functional properties of the Visual Word Form Area. *Brain*, *125*(5), 1054-1069.
- Cohen, L., Martinaud, O., Lemer, C., Lehéricy, S., Samson, Y., Obadia, M., Slachevsky, A., & Dehaene, S. (2003). Visual word recognition in the left and the right hemispheres: anatomical and functional correlates of peripheral alexias. *Cerebral cortex*, *13*(12), 1313-

1333.

Coltheart, M., Rastle, K., Perry, C., Langdon, R., & Ziegler, J. (2001). DRC: a dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychological Review*, *108*(1), 204-256.

Conrad, M., Carreiras, M., Tamm, S., & Jacobs, A. M. (2009). Syllables and bigrams: orthographic redundancy and syllabic units affect visual word recognition at different processing levels. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *35*(2), 461-479.

Conrad, M., & Jacobs, A. M. (2004). Replicating syllable frequency effects in Spanish in German: one more challenge to computational models of visual word recognition. *Language and Cognitive Processes*, *19*(3), 369-390.

Costanzo, F., Menghini, D., Caltagirone, C., Oliveri, M., & Vicari, S. (2012). High frequency rTMS over the left parietal lobule increases non-word reading accuracy. *Neuropsychologia*, *50*(11), 2645-2651.

Damasio, A. R., & Damasio, H. (1983). The anatomic basis of pure alexia. *Neurology*, *33*(12), 1573-1583.

Dawson, G.D. (1954). A summation technique for the detection of small evoked potentials. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *6*, 153-154.

Dehaene, S., & Cohen, L. (2007). Cultural recycling of cortical maps. *Neuron*, *56*(2), 384-398.

Dehaene, S., Cohen, L., Sigman, M., & Vinckier, F. (2005). The neural code for written words: a proposal. *Trends in Cognitive Sciences*, *9*(7), 335-341.

Dehaene, S., Jobert, A., Naccache, L., Ciuciu, P., Poline, J. B., Le Bihan, D., & Cohen, L. (2004). Letter binding and invariant recognition of masked words: behavioral and neuroimaging evidence. *Psychology Science*, *15*(5), 307-313.

- Dehaene, S., Le Clec'H, G., Poline, J. B., Le Bihan, D., & Cohen, L. (2002). The visual word form area: a prelexical representation of visual words in the fusiform gyrus. *NeuroReport* 13(3), 321-325.
- Dehaene, S., Naccache, L., Cohen, L., Bihan, D. L., Mangin, J. F., Poline, J. B., & Rivière, D. (2001). Cerebral mechanisms of word masking and unconscious repetition priming. *Nature and Neuroscience*, 4(7), 752-758.
- Dehaene, S., Pegado, F., Bragan L. W., Ventura, P., Nunes Filho, G., Jobert, A., Dehaene-Lambertz, G., Kolinsky, R., Morais, J., & Cohen, L. (2010). How learning to read changes the cortical networks for vision and language. *Science*, 330(6009), 1359-1364.
- Déjerine, J. (1892). Contribution à l'étude anatomo-pathologique et clinique des différentes variétés de cécité verbale. *Mémoires de la Société de Biologie*, 4, 61–90.
- Demb, J. B., Boynton, G. M., & Heeger, D. J. (1997). Brain activity in visual cortex predicts individual differences in reading performance. *PNAS*, 94(24), 13363–13366.
- Demb, J. B., Boynton, G. M., & Heeger, D. J. (1998). Functional magnetic resonance imaging of early visual pathways in dyslexia. *Journal of Neuroscience*, 18(17), 6939-6951.
- Deng, Y., Guo, R., Ding, G., & Peng, D. (2012). Top-Down modulations from dorsal stream in lexical recognition: an effective connectivity fMRI study. *PloS ONE*, 7(3).
- Dhar, M., Been, P. H., Minderaa, R. B., & Althaus, M. (2008). Distinct information processing characteristics in dyslexia and ADHD during a covert orienting task: an event-related potential study. *Clinical Neurophysiology*, 119(9), 2011–2025.
- Dispaldro, M., Leonard, L. B., Corradi, N., Ruffino, M., Bronte, T., Facoetti, A. (2012). Visual attentional engagement deficits in children with Specific Language Impairment and their role in real-time language processing. *Cortex*, *in press*.
- Doignon-Camus, N., Bonnefond, A., Touzalain-Chrétien, P., & Dufour, A. (2009). Early perception of written syllables in French: An event related potential study. *Brain & Language*,

111(1), 55-60.

- Doignon-Camus, N., Seigneuric, A., Perrier, E., Sisti, A., & Zagar, D. (2012). Evidence for a preserved sensitivity to orthographic redundancy and an impaired access to phonological syllables in French developmental dyslexics. *Annals of Dyslexia*, *in press*.
- Doignon, N., & Zagar, D. (2005). Illusory conjunctions in French: The nature of sublexical units in visual word recognition. *Language and Cognitive Processes*, *20*(3), 443-464.
- Doignon-Camus, N., & Zagar, D. (2009). Les enfants apprentis lecteurs perçoivent-ils la syllabe à l'écrit? Le modèle DIAMS. Dans Marec-Breton, N., Besse, A.S., de la Haye, F., Bonneton, N., & Bonjour, E. (Eds.) *Apprentissage du langage écrit: Approche cognitive*. Presses Universitaires de Rennes, 33-48.
- Doignon-Camus, N., & Zagar, D. (in press). The syllabic bridge: the first step in learning spelling-to-sound correspondences. *Journal of Child Language*.
- Doignon-Camus, N., Zagar, D., & Mathey, S. (2009). Can we see syllables in monosyllabic words? A study with illusory conjunctions. *Journal of Cognitive Psychology*, *21*(4), 599-614.
- Dujardin, T., Etienne, Y., Contentin, C., Bernard, C., Largy, P., Mellier, D., Lalonde, R., & Rebai, M. (2011). Behavioral performances in participants with phonological dyslexia and different patterns on the N170 component. *Brain & Cognition*, *75*(2), 91-100.
- Dunlop, P. (1972). Dyslexia: The orthoptic approach. *Australian Journal of Orthoptics*, *12*, 16-20.
- Dürrwächter, U., Sokolov, A. N., Reinhard, J., Klosinski, G., & Trauzettel-Klosinski, S. (2010). Word length and word frequency affect eye movements in dyslexic children reading in a regular (German) orthography. *Annals of Dyslexia*, *60*(1), 86-101.
- Eden, G. F., VanMeter, J. W., Rumsey, J. M., Maisog, J. M., Woods, R. P., & Zeffiro, T. A. (1996). Abnormal processing of visual motion in dyslexia revealed by functional brain

- imaging. *Nature*, 382(6586), 66-69.
- Eriksen, B. A., & Eriksen, C. W. (1974). Effects of noise letters upon the identification of a target letter in a nonsearch task. *Perception & Psychophysics*, 16(1), 143-149.
- Facoetti, A., Lorusso, M. L., Paganoni, P., Cattaneo, C., Galli, R., & Mascetti, G. G. (2003). The time course of attentional focusing in dyslexic and normally reading children. *Brain & Cognition*, 53(2), 181-184.
- Facoetti, M., & Molteni, M. (2001). The gradient of visual attention in developmental dyslexia. *Neuropsychologia*, 39(4), 352-357.
- Facoetti, A., Paganoni, P., & Lorusso, M. L. (2000). The spatial distribution of visual attention in developmental dyslexia. *Experimental Brain Research*, 132(4), 531-38.
- Facoetti, A., Paganoni, P., Turatto, M., Marzola, V., & Mascetti, G. G. (2000). Visual-spatial attention in developmental dyslexia. *Cortex*, 36(1), 109-123.
- Facoetti, A., Ruffino, M., Peru, A., Paganoni, P., & Chelazzi, L. (2008). Sluggish engagement and disengagement of non-spatial attention in dyslexic children. *Cortex*, 44(9), 1221-1233.
- Facoetti, A., Trussardi, A. N., Ruffino, M., Lorusso, M. L., Cattaneo, C., Galli, R., Molteni, M., & Zorzi, M. (2010). Multisensory spatial attention deficits are predictive of phonological decoding skills in developmental dyslexia. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 22(5), 1011-1025.
- Facoetti, A., & Turatto, M. (2000). Asymmetrical visual fields distribution of attention in dyslexic children: a neuropsychological study. *Neuroscience Letters*, 290(3), 216-218.
- Facoetti, A., Turatto, M., Lorusso, M. L., & Mascetti, G. G. (2001). Orienting of visual attention in dyslexia: evidence for asymmetric hemispheric control of attention. *Experimental Brain Research*, 138(1), 46-53.
- Facoetti, A., Zorzi, M., Cestnick, L., Lorusso, M. L., Molteni, M., Paganoni, P., Umiltà, C., & Mascetti, G. G. (2006). The relationship between visuo-spatial attention and nonword

- reading in developmental dyslexia. *Cognitive Neuropsychology*, 23(6), 841-855.
- Ferrand, L., & Grainger, J. (1992). Phonology and orthography in visual word recognition: evidence from masked non-word priming. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology: Human Experimental Psychology A: Human Experimental Psychology*, 45(3), 353-372.
- Fletcher J. M., Shaywitz, S. E., Shankweiler, D. P., Katz, L., Liberman, I. Y., Stuebing, K. K., Francis, D. J., Fowler, A. E., & Shaywitz, B. A. (1994). Cognitive profiles of reading disability: Comparisons of discrepancy and low achievement definitions. *Journal of Educational Psychology*, 86(1), 6-23.
- Franceschini, S., Gori, S., Ruffino, M., Pedrolli, K., & Facoetti, A. (2012). A causal link between visual spatial attention and reading acquisition. *Current Biology*, 22(9), 814-819.
- Frederickson, N., Frith, U., & Reason, R. (1997). Phonological Assessment Battery. Windsor: NFER-NELSON.
- Frith, U. (2001). What framework should we use for understanding developmental disorders? *Developmental Neuropsychology*, 20(2), 555-563.
- Frost, R. (1998). Toward a strong phonological theory of visual word recognition: true issues and false trails. *Psychological Bulletin*, 123(1), 71-99.
- Fu, S., Chen, Y., Smith, S., Iversen, S., & Matthews, P. M. (2002). Effects of word form on brain processing of written Chinese. *NeuroImage*, 17(3), 1538-1548.
- Galaburda, A. M., & Kemper, T. L. (1979). Cytoarchitectonic abnormalities in developmental dyslexia: a case study. *Annals in Neurology*. 6, 94-100
- Galaburda, A. M., Sherman, G. P., Rosen, G. D., Aboitiz, F., & Geschwind, N. (1985). Developmental dyslexia: Four consecutive patients with cortical anomalies. *Annals in Neurology*, 18, 222-233.
- Gauthier, I., Curran, T., Curby, K. M., & Collins, D. (2003). Perceptual interference supports

- a non-modular account of face processing. *Nature Neuroscience*, 6(4), 428-432.
- Geiger, G., Cattaneo, C., Galli, R., Pozzoli, U., Lorusso, M. L., Facoetti, A., & Molteni, M. (2008). Wide and diffuse perceptual modes characterize dyslexics in vision and audition. *Perception*, 37(11), 1745-64.
- Gomez Gonzalez, C. M., Clark, V. P., Fan, S., Luck, S. J., & Hillyard, S. A. (1994). Sources of attention sensitive visual event related potentials. *Brain Topography*, 7(1), 41-51.
- Goswami, U. (2000). Phonological representations, reading development and dyslexia: towards a cross-linguistic theoretical framework. *Dyslexia*, 6(2), 133-151.
- Grainger, J., & Ziegler, J. C. (2011). A dual-route approach to orthographic processing. *Frontiers in psychology*, 2(54).
- Gratton, G., Coles, M.G., & Donchin, E. (1983). A new method for off-line removal of ocular artifact. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 55(4), 468-84.
- Greene, D. J., Barnea, A., Herzberg, K., Rassis, A., Neta, M., Raz, A., & Zaidel, E. (2008). Measuring attention in the hemispheres: the lateralized attention network test (LANT). *Brain & Cognition*, 66(1), 21-31.
- Hagen, G. F., Gatherwright, J. R., Lopez, B. A., & Polich, J. (2006). P3a from visual stimuli: task difficulty effects. *International Journal of Psychophysiology*, 59(1), 8-14.
- Hall, D. A., Humphreys, G. W., & Cooper, A. C. (2001). Neuropsychological evidence for case-specific reading: multi-letter units in visual word recognition. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology A: Human Experimental Psychology*, 54(2), 439-467.
- Hallgren, B. (1950). Specific dyslexia ("congenital word-blindness"): a clinical and genetic study. *Acta Psychiatrica et Neurologica. Supplementum*, 65, 1-287.
- Hari, R., & Koivikko H. (1999). Left-side mini-neglect and attentional sluggishness in dyslexic adult. *Society of Neuroscience Abstract*, 25, 1634.
- Hari, R., & Renvall, H. (2001). Impaired processing of rapid stimulus sequences in dyslexia.

- Trends in Cognitive Sciences*, 5(12), 525-532.
- Hari, R., Valta, M., & Uutela, K. (1999). Prolonged attentional dwell time in dyslexic adults. *Neuroscience Letters*, 271(3), 202–204.
- Harm, M. W., & Seidenberg, M. S. (2004). Computing the meanings of words in reading: cooperative division of labor between visual and phonological processes. *Psychological Review*, 111(3), 662-720.
- Hasko, S., Bruder, J., Bartling, J., & Schulte-Körne, G. (2012). N300 indexes deficient integration of orthographic and phonological representations in children with dyslexia. *Neuropsychologia*, 50(5), 640-654.
- Hauk, O., Coutout, C., Holden, A., & Chen, Y. (2012). The time course of single word reading: evidence from fast behavioural and brain responses. *NeuroImage*, 60(2), 1492-1477.
- Hauk, O., & Pulvermüller, F. (2004). Effects of word length and frequency on the human event-related potential. *Clinical Neurophysiology*, 115(5), 1090-1103.
- Helenius, P., Tarkiainen, A., Cornelissen, P., Hansen, P.C., & Salmelin, R. (1999). Dissociation of normal feature analysis and deficient processing of letter-strings in dyslexic adults. *Cerebral Cortex*, 9(5), 476-483.
- Hillis, A. E., Wityk, R. J., Tuffiash, E., Beauchamp, N. J., Jacobs, M. A., Barker, P. B., & Selnes, O. A. (2001). Hypoperfusion of Wernicke's area predicts severity of semantic deficit in acute stroke. *Annals of Neurology*, 50(5), 561-566.
- Hillyard, S., Teder-Sälejärvi, W. A., & Münte, T. F. (1998). Temporal dynamics of early perceptual processing. *Current Opinion in Neurobiology*, 8(2), 202-210.
- Hinshelwood, J. (1917). Congenital word blindness. *HK Lewis & co. London*.
- Hoover, W. A., & Gough, P. B. (1990). The simple view of reading. *Reading & Writing: An Interdisciplinary Journal*, 2(2), 127-160.

- Horwitz, B., Rumsey, J. M., & Donohue, B. C. (1998). Functional connectivity of the angular gyrus in normal reading and dyslexia. *PNAS*, *95*(15), 8939-8944.
- Hu, W., Lee, H. L., Zhang, Q., Liu, T., Geng, L. B., Seghier, M. L., Shakeshaft, C., Twomey, T., Green, D. W., Yang, Y. M., & Price, C. J. (2010). Developmental dyslexia in Chinese and English populations: dissociating the effect of dyslexia from language differences. *Brain*, *133*(6), 1694–1706.
- Huckauf, A., Heller, D., & Nazir, T. A. (1999). Lateral masking: Limitations of the feature interaction account. *Perception & Psychophysics*, *61*(1), 177-189.
- Hutzler, F., Bergmann, J., Conrad, M., Kronbichler, M., Stenneken, P., & Jacobs, A. M. (2004). Inhibitory effects of first syllable frequency in lexical decision: an event related potential study. *Neuroscience Letters*, *372*(3), 179-184.
- Iles, J., Walsh, V., & Richardson, A. (2000). Visual search performance in dyslexia. *Dyslexia*, *6*(3), 163-177.
- Jednoróg, K., Marchewka, A., Tacikowski, P., Heim, S., & Grabowska, A. (2011). Electrophysiological evidence for the magnocellular-dorsal pathway deficit in dyslexia. *Developmental Science*, *14*(4), 873-880.
- Johnstone, S. J., Barry, R. J., Markovska, V., Dimoska, A., & Clarke, A. R. (2009). Response inhibition and interference control in children with AD/HD: a visual ERP investigation. *International Journal of Psychophysiology*, *72*(2), 145-153.
- Juphard, A., Carbonnel, S., Ans, B., & Valdois, S. (2006). Length effect in naming and lexical decision: the multitrace memory model's account. *Current Psychology Letters*, *19*(2).
- Kanwisher, N., & Wojciulik, E. (2000). Visual attention: insights from brain imaging. *Natural Reviews Neuroscience*, *1*(2), 91-100.
- Kerns, J. G., Cohen, J. D., MacDonald, A.W. 3rd, Cho, R. Y., Stenger, V. A., & Carter, C. S. (2004). Anterior cingulate conflict monitoring and adjustments in control. *Science*,

303(5660), 1023-1026.

Kevan, A., & Pammer, K. (2008). Visual deficits in pre-readers at familial risk for dyslexia.

*Vision Research*, 48(28), 2835-2839.

Kim, A. E., & Straková, J. (2012). Concurrent effects of lexical status and letter-rotation

during early stage visual word recognition: evidence from ERPs. *Brain Research*, 1468, 52-62.

Kronbichler, M., Hutzler, F., Wimmer, H., Mair, A., Staffen, W., & Ladurner, G. (2004). The visual word form area and the frequency with which words are encountered: evidence from a parametric fMRI study. *NeuroImage*, 21(3), 946-953.

Kronschabel, J., Schmid, R., Maurer, U., & Brandeis, D. (2013). Visual print tuning deficits in dyslexic adolescents under minimized phonological demands. *Neuroimage*, 1(74), 58-69.

LaBerge, D., & Brown, V. (1989). Theory of attentional operations in shape identification.

*Psychological Review*, 96(1), 101-124.

LaBerge, D., & Samuels, S. J. (1974). Toward a theory of automatic information processing

in reading. *Cognitive Psychology*, 6(2), 293-323.

Lallier, M., Donnadieu, S., Berger, C., & Valdois, S. (2010b). A case study of developmental dyslexia: Is the attentional deficit in the perception of rapid stimuli sequences amodal?

*Cortex*, 46(2), 231-241.

Lallier, M., Donnadieu, S., & Valdois, S. (2010a). Visual attentional blink in dyslexic

children: Parameterizing the deficit. *Vision Research*, 50(18), 1855-1861.

Lassus-Sangosse, D., N'Guyen-Morel, M. A., & Valdois, S. (2008). Sequential or

simultaneous visual processing deficit in developmental dyslexia. *Vision Research*, 48(8), 979-988.

Law, I., Kanao, I., Fujita, H., Lassen, N., Miura, S., & Uemura, K. (1991). Left

supramarginal/angular gyri activation during reading of syllabograms in the Japanese

- language. *Journal of Neurolinguistic*, 6(3), 243-251.
- Laycock, R., Crewther, S. G., & Crewther, D. P. (2007). A role for the "magnocellular advantage" in visual impairments in neurodevelopmental and psychiatric disorders. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 31(3), 363-376.
- Laycock, R., Crewther, D. P., Fitzgerald, P. B., & Crewther, S. G. (2009). TMS disruption of V5/MT + indicates a role for the dorsal stream in word recognition. *Experimental Brain Research*, 197(1), 69-79.
- Lefavrais, P. (1965). Test de l'Alouette. Paris: *Editions du Centre de Psychologie Appliquée*.
- Lien, M. C., Ruthruff, E., Kouchi, S., & Lachter, J. (2010). Even frequent and expected words are not identified without spacial attention. *Attention, Perception & Psychophysics*, 72(4), 973-988.
- Lindgren, S. D., De Renzi, E., & Richman, L. C. (1985). Cross-national comparisons of developmental dyslexia in Italy and the United States. *Child Development*, 56(6), 1404-1417.
- Liu T., Xiao, T., Shi, J., Zhao, D., Liu, J. (2011). Conflict control of children with different intellectual levels: an ERP study. *Neuroscience Letters*, 490(2), 101-106.
- Livingstone, M. S., Rosen, G. D., Drislane, F. W., & Galaburda, A. M. (1991). Physiological and anatomical evidence for a magnocellular defect in developmental dyslexia. *PNAS*, 88(18), 7943-7947.
- Lobier, M., Zoubrinetzky, R., & Valdois, S. (2012). The visual attention span deficit in dyslexia is visual and not verbal. *Cortex*, 48(6), 768-773.
- Lorusso, M. L., Facoetti, A., Pesenti, S., Cattaneo, C., Molteni, M., & Geiger, G. (2004). Wider recognition in peripheral vision common to different subtypes of dyslexia. *Vision Research*, 44(20), 2413-24.
- Luck, S. J., Heinze, H. J., Mangun, G. R., & Hillyard, S. A. (1990). Visual event-related

potentials index focused attention within bilateral stimulus arrays. II. Functional dissociation of P1 and N1 components. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 75(6), 528-542.

Lukatela, G., & Turvey, M. T. (1994). Visual lexical access is initially phonological: 2. Evidence from phonological priming by homophones and pseudohomophones. *Journal of Experimental Psychology: General*, 123(4), 331-353.

Macizo, P., & van Petten, C. (2007). Syllable frequency in lexical decision and naming of English words. *Reading and writing: An Interdisciplinary Journal*, 20(4), 295-331.

Madec, S., Rey, A., Dufau, S., Klein, M., & Grainger, J. (2012). The time course of visual letter perception. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 24(7), 1645-1655.

Mahé, G., Bonnefond, A., & Doignon-Camus, N. (2013). The time course of the syllable frequency effect in visual word recognition: evidence for both facilitatory and inhibitory effects in French. *Reading & Writing: An Interdisciplinary Journal*.

Martin, C. D., Thierry, G., & Démonet, J. F. (2010). ERP characterization of sustained attention effects in visual lexical categorization. *PLoS One*, 5(3).

Marzouki, Y., Grainger, J., & Theeuwes, J. (2007). Exogenous spatial cueing modulates subliminal masked priming. *Acta Psychologica*, 126(1), 34-45.

Mathey, S., & Zagar, D. (2002). Lexical similarity in visual word recognition: the effect of syllabic neighbourhood in French. *Current Psychology Letters: Behavior, Brain & Cognition*, 8, 107-121.

Mathey, S., Zagar, D., Doignon, N., & Seigneuric, A. (2006). The nature of the syllabic neighbourhood effect in French. *Acta Psychologica*, 123(3), 372-393.

Maurer, U., Brandeis, D., & McCandliss, B. (2005b). Fast, visual specialization for reading in English revealed by the topography of the N170 ERP response. *Behavioral Brain Function*, 1(13).

- Maurer, U., Brem, S., Bucher, K., & Brandeis, D. (2005a). Emerging neurophysiological specialization for letter strings. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *17*(10), 1532-1552.
- Maurer, U., Brem, S., Bucher, K., Kranz, F., Benz, R., Steinhausen, H.C., & Brandeis, D. (2007). Impaired tuning of a fast occipito-temporal response for print in dyslexic children learning to read. *Brain*, *130*(12), 3200-3210.
- Maurer, U., Brem, S., Kranz, F., Bucher, K., Benz, R., Halder, P., Steinhausen, H. C., & Brandeis, D. (2006). Coarse neural tuning for print peaks when children learn to read. *NeuroImage*, *33*(2), 749-758.
- Maurer, U., & McCandliss, B. (2007). The development of visual expertise for words: the contribution of electrophysiology. In: *Grigorenko EL, Naples AJ, editors. Single-word reading: biological and behavioral perspectives*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 43-63.
- Maurer, U., Schulz, E., Brem, S., van der Mark, S., Bucher, K., Martin, E., & Brandeis, D. (2011). The development of print tuning in children with dyslexia: evidence from longitudinal ERP data supported by fMRI. *NeuroImage*, *57*(3), 714-722.
- Mayall, K., Humphreys, G. W., Mechelli, A., Olson, A., & Price, C.J. (2001). The effects of case mixing on word recognition: evidence from a PET study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *13*(6), 844-853.
- McCandliss, B. D., & Noble, K. G. (2003). The development of reading impairment: a cognitive neuroscience model. *Mental Retardation and Developmental Disabilities Research Reviews*, *9*(3), 196-204.
- McCann, R. S., Folk, C. L., & Johnston, J. C. (1992). The role of spatial attention in visual word processing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *18*(4), 1015-1029.
- McCarthy G., & Nobre A. C. (1993). Modulation of semantic processing by spatial selective

- attention. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 88(3), 210-219.
- McClelland, J. L., & Rumelhart, D. E. (1981). An interactive activation model of context effects in letter perception: I. An account of the basic findings. *Psychological Review*, 88(5), 357-407.
- McCrory, E. J., Mechelli, A., Frith, U., & Price, C. J. (2005). More than words: a common neural basis for reading and naming deficits in developmental dyslexia? *Brain*, 128(2), 261-267.
- Mechelli, A., Gorno-Tempini, M. L., & Price, C. J. (2003). Neuroimaging studies of word and pseudoword reading: consistencies, inconsistencies and limitations. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15(2), 260-271.
- Menard, M. T., Kosslyn, S. M., Thompson, W. L., Alpert, N. M., & Rauch, S. L. (1996). Encoding words and pictures: a positron emission tomography study. *Neuropsychologia*, 34(3), 185-194.
- Milner, A. D., & Goodale, M. A. (1995). *The visual brain in action*. Oxford: Oxford University Press.
- Monzalvo, K., Fluss, J., Billard, C., Dehaene, S., & Dehaene-Lambertz G. (2012). Cortical networks for vision and language in dyslexic and normal children of variable socio-economic status. *NeuroImage*, 61(1), 258-274.
- Morgan, W. P. (1896). A case of congenital word blindness. *British Medical Journal*, 2(1871), 1378.
- Murtha, S., Chertkow, H., Beauregard, M., & Evans, A. (1999). The neural substrate of picture naming. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 11(4), 399-423.
- Näätänen, R., & Picton, T. W. (1987). The N1 wave of the human electric and magnetic response to sound: a review and an analysis of the component structure. *Psychophysiology*, 24(4), 375-425.

- Neuhaus, A. H., Koehler, S., Opgen-Rhein, C., Urbanek, C., Hahn, E., & Dettling, M. (2007). Selective anterior cingulate cortex deficit during conflict solution in schizophrenia: an event-related potential study. *Journal of Psychiatric Research, 41*(8), 635-644.
- Neuhaus, A. H., Urbanek, C., Opgen-Rhein, C., Hahn, E., Ta, T. M., Koehler, S., Gross, M., & Dettling, M. (2010). Event-related potentials associated with the Attention Network Test. *International Journal of Psychophysiology, 76*(2), 72-79.
- New, B., Ferrand, L., Pallier, C., & Brysbaert, M. (2006). Reexamining the word length effect in visual word recognition: New evidence from the English Lexicon Project. *Psychonomic Bulletin and Review, 13*(1), 45-52.
- New, B., Pallier, C., Ferrand, L., & Matos, R. (2001). Une base de données lexicales du français contemporain sur internet: Lexique. *L'Année Psychologique, 101*(3-4), 447-462.  
<http://www.lexique.org>
- Nicolson, R. I., & Fawcett, A. J. (1990). Automaticity: a new framework for dyslexia research? *Cognition, 35*(2), 159-182.
- Nicolson, R. I., Fawcett, A. J., & Dean, P. (2001). Dyslexia, development and the cerebellum. *Trends in Neurosciences, 24*(9), 515-516.
- Olulade, O. A., Flowers, D.L., Napoliello, E. M., & Eden, G. F. (2012). Developmental differences for word processing in the ventral stream. *Brain & Language, 125*(2), 134-145.
- Ortells, J. J., Tudela, P., Noguera, C., & Abad, M. J. F. (1998). Attentional orienting within visual field in a lexical decision task. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 24*(6), 1675-1689.
- Orton, S. (1937). Reading, writing and speech problems in children. *New York, NY: Norton.*
- Pacton, S., Perruchet, P., Fayol, M., & Cleeremans, A. (2001). Implicit learning out of the lab: the case of orthographic regularities. *Journal of Experimental Psychology. General, 130*(3), 401-426.

- Pammer, K., Hansen, P., Holliday, I., & Cornelissen, P. (2006). Attentional shifting and the role of the dorsal pathway in visual word recognition. *Neuropsychologia*, *44*(14), 2926-2936.
- Pammer, K., Lavis, R., Cooper, C., Hansen, P.C., & Cornelissen, P.L. (2005). Symbol-string sensitivity and adult performance in lexical decision. *Brain & Language*, *94*(3), 278-296.
- Paulesu, E., Démonet, J. F., Fazio, F., McCrory, E., Chanoine, V., Brunswick, N., Cappa, S. F., Cossu, G., Habib, M., Frith, C. D., & Frith, U. (2001). Dyslexia: cultural diversity and biological unity. *Science*, *291*(5511), 2165-2167.
- Perea, M., Panadero, V., Moret-Tatay, C., & Gomez, P. (2012). The effects of inter-letter spacing in visual word recognition: Evidence with young normal readers and developmental dyslexics. *Learning and Instruction*, *22*(6), 420–430.
- Perry, C., Ziegler, J. C., & Zorzi, M. (2007). Nested incremental modeling in the development of computational theories: the CDP+ model of reading aloud. *Psychological Review*, *114*(2), 273-315.
- Peyrin, C., Démonet, J. F., N'Guyen-Morel, M. A., Le Bas, J. F., & Valdois, S. (2010). Superior parietal lobule dysfunction in a homogeneous group of dyslexic children with a visual attention span disorder. *Brain & Language*, *118*(3), 128-138.
- Peyrin, C., Lallier, M., Démonet, J. F., Pernet, C., Baciou, M., Le Bas, J. F., & Valdois, S. (2012). Neural dissociation of phonological and visual attention span disorders in developmental dyslexia: fMRI evidence from two case reports. *Brain & Language*, *120*(3), 381-394.
- Polk, T. A., Stallcup, M., Aguirre, G. K., Alsop, D. C., D'Esposito, M., Detre, J. A., & Farah, M. J. (2002). Neural specialization for letter recognition. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *14*(2), 145-159.
- Posner, M. I., Walker, J. A., Friedrich, F. J., & Rafal, R. D. (1984). Effects of parietal injury

- on covert orienting of attention. *The Journal of Neuroscience*, 4(7), 1863-1874.
- Price, C. J., & Devlin, J. T. (2003). The myth of the visual word form area. *NeuroImage*, 19(3), 473-481.
- Price, C. J., & Devlin, J. T. (2011). The interactive account of ventral occipitotemporal contributions to reading. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(6), 246-253.
- Price, C. J., Wise, R. J. S., & Frackowiak, R. S. J. (1996). Demonstrating the implicit processing of visually presented words and pseudowords. *Cerebral Cortex*, 6(1), 62-70.
- Prinzmetal, W., Treiman, R., & Rho, S. H. (1986). How to see a reading unit? *Journal of Memory and Language*, 25(4), 461-475.
- Proverbio, A. M., Vecchi, L., & Zani, A. (2004). From orthography to phonetics: ERP measures of grapheme-to-phoneme conversion mechanisms in reading. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16(2), 301-317.
- Proverbio, A. M., & Zani, A. (2003). Time course of brain activation during graphemic/phonologic processing in reading: an ERP study. *Brain & Language*, 87(3), 412-420.
- Proverbio, A. M., Zani, A., & Adorni, R. (2008). The left fusiform area is affected by written frequency of words. *Neuropsychologia*, 46(9), 2292-2299.
- Pugh, K. R., Frost, S. J., Sandak, R., Landi, N., Moore, D., Della Porta, G., Rueckl, J. G., & Mencl, E. W. (2011). Mapping the Word Reading Circuitry in Skilled and Disabled Readers. In P. L. Cornelissen, P. C. Hansen, M. L. Kringelbach and K. Pugh, (Eds.), *The Neural Basis of Reading*, Oxford Press, 281-305.
- Pugh, K. R., Mencl, W. E., Jenner, A. R., Katz, L., Frost, S. J., Lee, J. R., Shaywitz, S. E., & Shaywitz, B. A. (2001). Neurobiological studies of reading and reading disability. *Journal of Communication Disorders*, 34(6), 479-492.
- Pugh, K. R., Mencl, W. E., Shaywitz, B. A., Shaywitz, S. E., Fulbright, R. K., Constable, R.

- T., Skudlarski, P., Marchione, K. E., Jenner, A. R., Fletcher, J. M., Liberman, A. M., Shankweiler, D. P., Katz, L., Lacadie, C., & Gore, J. C. (2000). The angular gyrus in developmental dyslexia: task-specific differences in functional connectivity within posterior cortex. *Psychological Science, 11(1)*, 51-56.
- Rack, J. P., Snowling, M. J., & Olson, R. K. (1992). The nonword reading deficit in developmental dyslexia: a review. *Reading Research Quarterly, 27(1)*, 28-53.
- Ramus, F., & Szenkovits, G. (2008). What phonological deficit? *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 61(1)*, 129-141.
- Rapport d'Expertise INSERM. (2007). Dyslexie, dysorthographe, dyscalculie: bilan des données scientifiques.
- Raven, J., Raven, J. C., & Court, J. H. (1998). Advanced progressive matrices. *Oxford: Oxford Psychologists Press.*
- Reinholz, J., & Pollmann, S. (2005). Differential activation of object-selective visual areas by passive viewing of pictures and words. *Brain Research. Cognitive Brain Research, 24(3)*, 702-714.
- Rey, A., Ziegler, J. C., & Jacobs, A. M. (2000). Graphemes are perceptual reading units. *Cognition, 75(1)*, B1-B12.
- Richlan, F., Kronbichler, M., & Wimmer, H. (2009). Functional abnormalities in the dyslexic brain: a quantitative meta-analysis of neuroimaging studies. *Human Brain Mapping, 30(10)*, 3299-3308.
- Richlan, F., Sturm, D., Schurz, M., Kronbichler, M., Ladurner, G., & Wimmer, H. (2010). A common left occipito-temporal dysfunction in developmental dyslexia and acquired letter-by-letter reading? *PLoS One, 5(8)*.
- Roach, N. W., & Hogben, J. H. (2004). Attentional modulation of visual processing in adult dyslexia: a spatial-cuing deficit. *Psychological Science, 15(10)*, 650-654.

- Rosazza, C., Cai, Q., Minati, L., Paulignan, Y., & Nazir, T. A. (2009). Early involvement of dorsal and ventral pathways in visual word recognition: An ERP study. *Brain Research*, *1272*, 32-44.
- Rossion, B., Joyce, C. A., Garrison Cottrell, G. W., & Tarr, M. (2003). Early lateralization and orientation tuning for face, word, and object processing in the visual cortex. *NeuroImage*, *20(3)*, 1609–1624.
- Rueda, M. R., Posner, M. I., Rothbart, M. K., & Davis-Stober, C. P. (2004). Development of the time course for processing conflict: an event-related potentials study with 4 year olds and adults. *BMC Neuroscience*, *5(39)*.
- Ruffino, M., Trussardi, A. N., Gori, S., Finzi, A., Giovagnoli, S., Menghini, D., Benassi, M., Molteni, M., Bolzani, R., Vicari, S., & Facoetti, A. (2010). Attentional engagement deficits in dyslexic children. *Neuropsychologia*, *48(13)*, 3793-3801.
- Rumelhart, D. E., & McClelland, J. L. (1982). An interactive activation model of context effects in letter perception: II. The contextual enhancement effect and some tests and extensions of the model. *Psychological Review*, *89(1)*, 60-94.
- Rumsey, J. M., Horwitz, B., Donohue, B. C., Nace, K. L., Maisog, J. M., & Andreason, P. (1999). A functional lesion in developmental dyslexia: left angular gyral blood flow predicts severity. *Brain & Language*, *70(2)*, 187-204.
- Rumsey, J. M., Nace, K., Donohue, B., Wise, D., Maisog, J. M., & Andreason, P. (1997). A positron emission tomographic study of impaired word recognition and phonological processing in dyslexic men. *Archives in Neurology*, *54(5)*, 562-573.
- Ruz, M., & Nobre, A. C. (2008). Attention modulates initial stages of visual word processing. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *20(9)*, 1727-1736.
- Salmelin, R., Service, E., Kiesilä, P., Uutela, K., & Salonen, O. (1996). Impaired visual word processing in dyslexia revealed with magnetoencephalography. *Annals of Neurology*, *40(2)*,

157-162.

Savill, N. J., & Thierry, G. (2011a). Electrophysiological evidence for impaired attentional engagement with phonologically-acceptable misspellings in developmental dyslexia.

*Frontiers in Psychology*, 2, 139.

Savill, N. J., & Thierry, G. (2011b). Reading for sound with dyslexia: Evidence for early orthographic and late phonological integration deficits. *Brain Research*, 1385, 192-205.

Savill, N. J., & Thierry, G. (2012). Decoding ability makes waves in reading: Deficient interactions between attention and phonological analysis in developmental dyslexia.

*Neuropsychologia*, 50(7), 1553-1564.

Seidenberg, M. S., & McClelland, J. L. (1989). A distributed, developmental model of word recognition and naming. *Psychological Review*, 96(4), 523-568.

Sereno, S. C., & Rayner, K. (2003). Measuring word recognition in reading: eye movements and event-related potentials. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(11), 489-493.

Sereno, S. C., Rayner, K., & Posner, M. I. (1998). Establishing a time-line of word recognition: evidence from eye movements and event-related potentials. *Neuroreport*, 9(10), 2195-2200.

Seymour, P. H., Aro, M., & Erskine, J. M. (2003). Foundation literacy acquisition in European orthographies. *British Journal of Psychology*, 94(2), 143-174.

Shaul, S., Arzouan, Y., & Goldstein, A. (2012). Brain activity while reading words and pseudo-words: a comparison between dyslexic and fluent readers. *International Journal of Psychophysiology*, 84(3), 270-276.

Shaywitz, S. E., Fletcher, J. M., Holahan, J. M., Shneider, A. E., Marchione, K. E., Stuebing, K. K., Francis, D. J., Pugh, K. R., & Shaywitz, B. A. (1999). Persistence of dyslexia: the Connecticut Longitudinal Study at adolescence. *Pediatrics*, 104(6), 1351-1359.

Shaywitz, S. E., Shaywitz, B. A., Pugh, K. R., Fulbright, R. K., Constable, R. T., Mencl, W.

- E., Shankweiler, D. P., Liberman, A. M., Skudlarski, P., Fletcher, J. M., Katz, L., Marchione, K. E., Lacadie, C., Gatenby, C., & Gore, J. C. (1998). Functional disruption in the organization of the brain for reading in dyslexia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, *95*(5), 2636–2641.
- Shaywitz, S. E., Shaywitz, B. A., Fulbright, R. K., Skudlarski, P., Mencl, W. E., Constable, R. T., Pugh, K. R., Holahan, J. M., Marchione, K. E., Fletcher, J. M., Lyon, G. R., & Gore, J. C. (2003). Neural systems for compensation and persistence: young adult outcome of childhood reading disability. *Biological Psychiatry*, *54*(1), 25-33.
- Shaywitz, B. A., Shaywitz, S. E., Pugh, K. R., Mencl, W. E., Fulbright, R. K., Skudlarski, P., Constable, R. T., Marchione, K. E., Fletcher, J. M., Lyon, G. R., & Gore, J. C. (2002). Disruption of posterior brain systems for reading in children with developmental dyslexia. *Biological Psychiatry*, *52*(2), 101-110.
- Schurz, M., Sturm, D., Richlan, F., Kronbichler, M., Ladurner, G., & Wimmer, H. (2010). A dual-route perspective on brain activation in response to visual words: evidence for a length by lexicality interaction in the visual word form area (VWFA). *NeuroImage*, *49*(3), 2649-2661.
- Siéroff, E., & Posner, M. I. (1988). Cueing spatial attention during processing of words and letter strings in normals. *Cognitive Neuropsychology*, *5*(4), 451–472.
- Simon, G., Bernard, C., Lalonde, R., & Rebaï, M. (2006). Orthographic transparency and grapheme-phoneme conversion: An ERP study in Arabic and French readers. *Brain Research*, *1104*(1), 141-152.
- Simon, G., Bernard, C., Largy, P., Lalonde, R., & Rebaï, M. (2004). Chronometry of visual word recognition during passive and lexical decision tasks: an ERP investigation. *International Journal of Neuroscience*, *114*(11), 1401–1432.
- Simos, P. G., Breier, J. I., Fletcher, J. M., Foorman, B. R., Bergman, E., Fishbeck, K., &

- Papanicolaou, A. C. (2000). Brain activation profiles in dyslexic children during non-word reading: a magnetic source imaging study. *Neuroscience Letters*, *290(1)*, 61-65.
- Somers, D. C., Dale, A. M., Seiffert, A. E., & Tootell, R. B. H. (1999). Functional MRI reveals spatially specific attentional modulation in human primary visual cortex. *PNAS*, *96(4)*, 1663-1668.
- Snowling, M. J. (2000). *Dyslexia* (2nd ed.). Oxford, UK: Blackwell.
- Soroli, E., Szenkovits, G., & Ramus, F. (2010). Exploring dyslexics' phonological deficit III: foreign speech perception and production. *Dyslexia*, *16(4)*, 318-340.
- Sprenger-Charolles, L., Colé, P., Kipffer-Piquard, A., Pinton, F., & Billard, C. (2009). Reliability and prevalence of an atypical development of phonological skills in French-speaking dyslexics. *Reading & Writing: An Interdisciplinary Journal*, *27(7)*, 811-842.
- Sprenger-Charolles, L., Colé, P., Lacert, P., & Serniclaes, W. (2000). On subtypes of developmental dyslexia: evidence from processing time and accuracy scores. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, *54(2)*, 87-104.
- Stanberry, L. I., Richards, T. L., Berninger, V. W., Nandy, R. R., Aylward, E. H., Maravilla, K. R., Stock, P. S., & Cordes, D. (2006). Low-frequency signal changes reflect differences in functional connectivity between good readers and dyslexics during continuous phoneme mapping. *Magnetic Resonance Imaging*, *24(3)*, 217-229.
- Stanovich, K. E., & Siegel, L. S. (1994). Phenotypic performance profile of children with reading disabilities: a regression-based test of the phonological-core variable-difference model. *Journal of Educational Psychology*, *86(1)*, 24-53.
- Stein, J., & Walsh, V. (1997). To see but not to read; the magnocellular theory of dyslexia. *Trends in Neurosciences*, *20(4)*, 147-152.
- Stephenson, S. (1907). Six cases of congenital wordblindness affecting three generations of one family. *Ophthalmoscope*, *5*, 482-484.

- Tallal, P., Miller, S., & Fitch, R. H. (1993). Neurobiological basis of speech: a case for the preeminence of temporal processing. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 682, 27-47.
- Tanaka, J. W., & Curran, T. (2001). A neural basis for expert object recognition. *Psychological Science*, 12(1), 43-47.
- Tarkiainen, A., Cornelissen, P. L., & Salmelin, R. (2002). Dynamics of visual feature analysis and object-level processing in face versus letter-string perception. *Brain*, 125(5), 1125-1136.
- Tarkiainen, A., Helenius, P., Hansen, P. C., Cornelissen, P. L., & Salmelin, R. (1999). Dynamics of letter string perception in the human occipitotemporal cortex. *Brain*, 122(11), 2119-2132.
- Taroyan, N. A., Nicolson, R. I., & Fawcett, A. J. (2007). Behavioral and neurophysiological correlates of dyslexia in the continuous performance task. *Clinical Neurophysiology*, 118(4), 845-855.
- Torgesen, J. K., Wagner, R. K., & Rashotte, C. A. (1994). Longitudinal studies of phonological processing and reading. *Journal of Learning Disabilities*, 27(5), 276-286.
- Ungerleider, L. G., & Mishkin, M. (1982). Two cortical visual systems. In Ingle D. J., Goodale, M. A., & Mansfield, R. J. W. (Eds.), *Analysis of visual behaviour* (p. 549-586). Cambridge, MA: The MIT Press.
- Valdois, S., Bosse, M. L., Ans, B., Carbonnel, S., Zorman, M., David, D., & Pellat, J. (2003). Phonological and visual processing deficits can dissociate in developmental dyslexia: Evidence from two case studies. *Reading & Writing: An Interdisciplinary Journal*, 16(6), 541-572.
- Valdois, S., Lassus-Sangosse, D., & Lobier, M. (2012). Impaired letter-string processing in developmental dyslexia: what visual-to-phonology code mapping disorder? *Dyslexia*, 18(2), 77-93.

- Vanderberghe, R., Price, C., Wise, R., Josephs, O., & Frackowiak, R. S. (1996). Functional anatomy of a common semantic system for words and pictures. *Nature*, *383*(6597), 254-256.
- Van der Mark, S., Bucher, K., Maurer, U., Schulz, E., Brem, S., Buckelmüller, I., Kronbichler, M., Loenneker, T., Klaver, P., Martin, E., & Brandeis, D. (2009). Children with dyslexia lack multiple specializations along the visual word-form (VWF) system. *NeuroImage*, *47*(4), 1940-1949.
- Van der Mark, S., Klaver, P., Bucher, K., Maurer, U., Schulz, E., Brem, S., Martin, E., & Brandeis, D. (2011). The left occipitotemporal system in reading: disruption of focal fMRI connectivity to left inferior frontal and inferior parietal language areas in children with dyslexia. *NeuroImage*, *54*(3), 2426-2436.
- Van Veen, V., & Carter, C.S. (2002). The timing of action-monitoring processes in the anterior cingulate cortex. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *14*(4), 593-602.
- Vellutino, F. R. (1979). *Dyslexia: Research and theory*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Vellutino, F. R., Scanlon, D. M., & Spearing, D. (1995). Semantic and phonological coding in poor and normal readers. *Journal of Experimental Child Psychology*, *59*(1), 76-123.
- Vidyasagar, T.R. (1999). A neuronal model of attentional spotlight: parietal guiding the temporal. *Brain research reviews*, *30*(1), 66-76.
- Vidyasagar, T. R., & Pammer, K. (1999). Impaired visual search in dyslexia relates to the role of the magnocellular pathway in attention. *Neuroreport*, *10*(6), 1283-1287.
- 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.
- Vinckier, F., Dehaene, S., Jobert, A., Dubus, J.P., Sigman, M., & Cohen, L. (2007). Hierarchical coding of letter strings in the ventral stream: dissecting the inner organization of the visual word-form system. *Neuron*, *55*(1), 143-156.
- Vinckier, F., Naccache, L., Papeix, C., Forget, J., Hahn-Barma, V., Dehaene, S., & Cohen, L.

- (2006). “What” and “where” in word reading: ventral coding of written words revealed by parietal atrophy. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *18*(12), 1998–2012.
- Visser, T. A., Boden, C., & Giaschi D. E. (2004). Children with dyslexia: evidence for visual attention deficits in perception of rapid sequences of objects. *Vision Research*, *44*(21), 2521-2535.
- Vogel, A. C., Miezin, F. M., Petersen, S. E., & Schlaggar, B. L. (2012). The putative visual word form area is functionally connected to the dorsal attention network. *Cerebral Cortex*, *22*(3), 537-549.
- Von Cramon, D., & Kerkhoff, G. (1993). On the cerebral organization of elementary visuospatial perception. In Gulyas, D., Ottoson, D. & Roland P. (Eds.), *Functional organization of the human visual cortex* (p. 211-231). Oxford: Pergamon Press.
- Warrington, E. K., & Shallice, T. (1980). Word-form dyslexia. *Brain*, *103*(1), 99-112.
- Weekes, S. (1997). Differential effects of number of letters on word and nonword naming latency. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A: Human Experimental Psychology*, *50*(2), 439-456.
- Wilson, L. B., Tregellas, J. R., Slason, E., Pasko, B. E., & Rojas, D. C. (2011). Implicit phonological priming during visual word recognition. *NeuroImage*, *55*(2), 724-731.
- Wimmer, H., Hutzler, F., & Wiener, C. (2002). Children with dyslexia and right parietal lobe dysfunction: event-related potentials in response to words and pseudowords. *Neuroscience Letters*, *331*(3), 211-213.
- Wimmer, H., & Schurz, M. (2010). Dyslexia in regular orthographies: manifestation and causation. *Dyslexia*, *16*(4), 283-299.
- Wimmer, H., Schurz, M., Sturm, D., Richlan, F., Klackl, J., Kronbichler, M., & Ladurner, G. (2010). A dual-route perspective on poor reading in a regular orthography: an fMRI study. *Cortex*, *46*(10), 1284-1298.

- Yamazaki, T., Kamijo, K., Kenmochi, A., Fukuzumi, S., Kiyuna, T., Takaki, Y., & Kuroiwa, Y. (2000). Multiple equivalent current dipole source localization of visual event-related potentials during oddball paradigm with motor response. *Brain Topography*, *12*(3), 159-175.
- Yeung, N., Botvinick, M. M., & Cohen, J. D. (2004). The neural basis of error detection: conflict monitoring and the error-related negativity. *Psychological Review*, *111*(4), 931-959.
- Yin, X., Zhao, L., Xu, J., Evans, A. C., Fan, L., Ge, H., Tang, Y., Khundrakpam, B., Wang, J., & Liu, S. (2012). Anatomical substrates of the alerting, orienting and executive control components of attention: focus on the posterior parietal lobe. *PLoS One*, *7*(11).
- Yoncheva, Y. N., Blau, V. C., Maurer, U. & McCandliss, B. D. (2010b). Attentional focus during learning impacts N170 ERP responses to an artificial script. *Developmental Neuropsychology*, *35*(4), 423-445.
- Yoncheva, Y. N., Zevin, J. D., Maurer, U., & McCandliss, B. (2010a). Auditory selective attention to speech modulates activity in the visual word form area. *Cerebral Cortex*, *20*(3), 622-632.
- Ziegler, J. C., Castel, C., Pech-Georgel, C., George, F., Alario, F. X., & Perry, C. (2008). Developmental dyslexia and the dual route model of reading: simulating individual differences and subtypes. *Cognition*, *107*(1), 151-178.
- Ziegler, J. C., & Goswami, U. (2005). Reading acquisition, developmental dyslexia, and skilled reading across languages: a psycholinguistic grain size theory. *Psychological Bulletin*, *131*(1), 3-29.
- Ziegler, J.C., Pech-Georgel, C., Dufau, S., & Grainger, J. (2010). Rapid processing of letters, digits and symbols: what purely visual-attentional deficit in developmental dyslexia? *Developmental Science*, *13*(4), F8–F14.
- Ziegler, J. C., Perry, C., Jacobs, A. M., & Braun, M. (2001). Identical words are read differently in different languages. *Psychological Science* *12*(5), 379-384.

Zoccolotti, P., de Luca, M., di Pace, E., Gasperini, F., Judica, A., & Spinelli, D. (2005).

Word

length effect in early reading and in developmental dyslexia. *Brain & Language*, *93*(3), 369-373.

Zorzi, M., Barbiero, C., Facoetti, A., Lonciari, I., Carrozzi, M., Montico, M., Bravar, L.,

George, F., Pech-Georgel, C., & Ziegler, J. C. (2012). Extralarge letter spacing improves reading in dyslexia. *PNAS*, *109*(28), 11455-11459.

## Table des abréviations

CDP +: Connectionist Dual Process model

DRC: Dual Route Cascaded model

EEG: Electroencéphalographie

ERP: Event Related Potentials

IA: Interactive Activation

IAS: Interactive Activation with Syllables

IRMf: Imagerie à Résonance Magnétique Fonctionnelle

LCD: Local Combination Detectors

MEG: Magnétoencéphalographie

MTM: Multi-Trace Memory model

PET scan: tomographie par émission de positons

RMS: Root Mean Square

TMS: Stimulation Magnétique Transcranienne

TRs: Temps de réactions

VWFA: Visual Word Form Area

# ANNEXES

## Annexe 1. Publications

**Mahé, G.,** Bonnefond, A., Gavens, N., Dufour, A., & Doignon-Camus, N. (2012). Impaired visual expertise for print in french adults with dyslexia as shown by N170 tuning. *Neuropsychologia, 50(14):* 3200-3206.

**Mahé, G.,** Bonnefond, A., & Doignon-Camus, N. (2013). The time course of the syllable frequency effect in visual word recognition: evidence for both facilitatory and inhibitory effects in French. *Reading & Writing: An Interdisciplinary Journal.*

**Mahé, G.,** Bonnefond, A., & Doignon-Camus, N. (in revision). Is the impaired N170 print tuning specific to developmental dyslexia? A matched reading level study with poor readers and dyslexics. *Brain & Language.*

**Mahé, G.,** Doignon-Camus, N., Dufour, A., & Bonnefond, A. (in press). Conflict control processing in adults with developmental dyslexia: an event related potentials study. *Clinical Neurophysiology.*

**Mahé, G.,** Bonnefond, A., & Doignon-Camus, N. (in revision). Involvement of ventral and dorsal pathways in visual word recognition in dyslexia. *Brain & Cognition.*

## **Annexe 2. Communications**

**Mahé, G.,** Bonnefond, A., & Doignon-Camus, N. Ventral & Dorsal pathways implication in visual word recognition: an event related potential study with dyslexics using matched age and reading level designs. Communication orale prévue au 18<sup>ème</sup> meeting de l'European Society for Cognitive Psychology (ESCOP) à Budapest, Août, 2013.

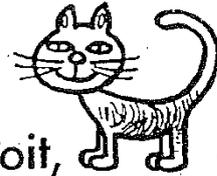
**Mahé, G.,** Bonnefond, A., Dufour, A., & Doignon-Camus, N. Is the impaired N170 tuning specific to dyslexia? Matched age and reading-level studies in adult readers. Poster présenté au Third Oxford-Kobe Symposium, avril 2013.

**Mahé, G.,** Bonnefond, A., Dufour, A., & Doignon-Camus, N. Expertise to print (N170): is the deficit specific to developmental dyslexia? Poster présenté au Neurex annual meeting à Strasbourg, octobre 2012.

**Mahé, G.,** Bonnefond, A., Dufour, A., & Doignon-Camus, N. Ventral & Dorsal pathways interaction during visual word recognition in adult dyslexics: an ERPs study. Poster présenté au 17<sup>th</sup> meeting de l'European Society for Cognitive Psychology (ESCOP) à San Sebastian, septembre 2011.

### Annexe 3. Test de l'Alouette

#### L'alouette.



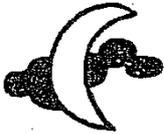
Sous la mousse ou sur le toit,  
dans les haies vives ou le chêne fourchu,  
le printemps a mis ses nids.  
Le printemps a nids au bois.



Annie-amie, du renouveau, c'est le doux temps.  
Amie Annie, au bois joli gamine le pinson.  
Dans les buis, gîte une biche, au bois chantant.  
Annie, Annie! au doigt joli, une églantine laisse du sang :  
au bout du temps des féeries viendra l'ennui.



L'alouette fait ses jeux; alouette fait un nœud avec un rien de paille.  
L'hirondeau piaille sous la pente des bardeaux et, vif et gai, le geai  
sur l'écaille argentée du bouleau, promène un brin d'osier.  
Au verger, dans le soleil matinal, goutte une pompe dégelée.  
On voit un bec luisant qui trille éperdument des notes claires  
et, dans les pampres d'or que suspend la grille antique,  
on surprend des rixes de moineaux.  
Au potager s'alignent les cordeaux; l'if est triste à l'horizon  
et lourd et lent l'envol des corbeaux.



Un lac étire ses calmes rives et, quand le soir descend,  
le miroir de ses eaux reflète les poisons des brignoles perfides.  
Et, quand descend le soir, quand joue la pourpre du couchant,  
le ciel rougit ses eaux.  
Dans la moire de l'eau danse l'ombre d'un écueil.  
Tout est cris! Tout est bruits!

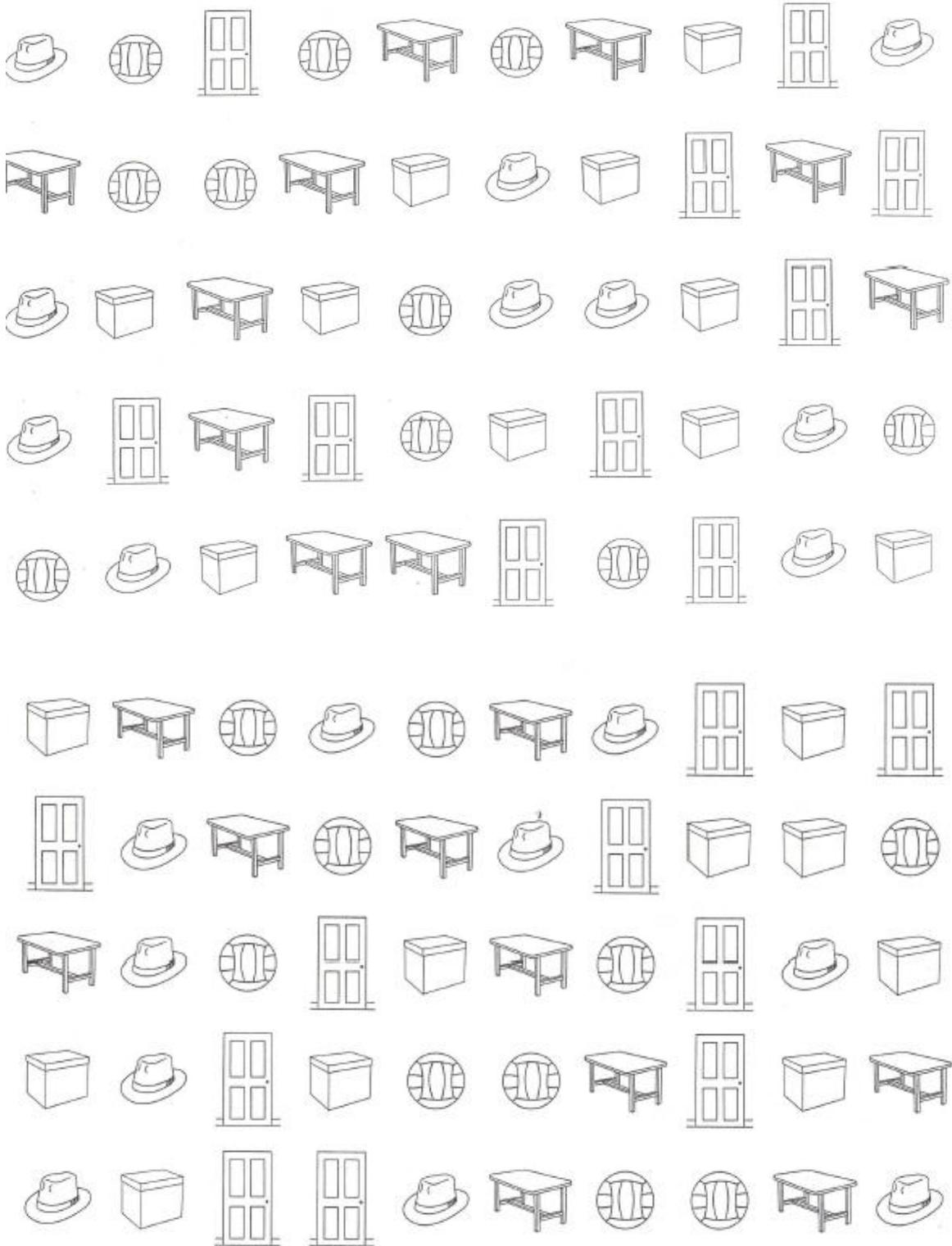


Une amarre est décochée... une barque est arrimée... des matelots  
jettent leurs cassettes sur le rivage...  
Tout est cris! Tout est bruits!  
Au clair de la lune mon ami Pierrot...  
Au clair de lune mon amie annie...  
Au clair de la lune mon ami Pierrot, prête-moi la plume pour écrire un mot.



## Annexe 4. Test de dénomination

### Dénomination d'images

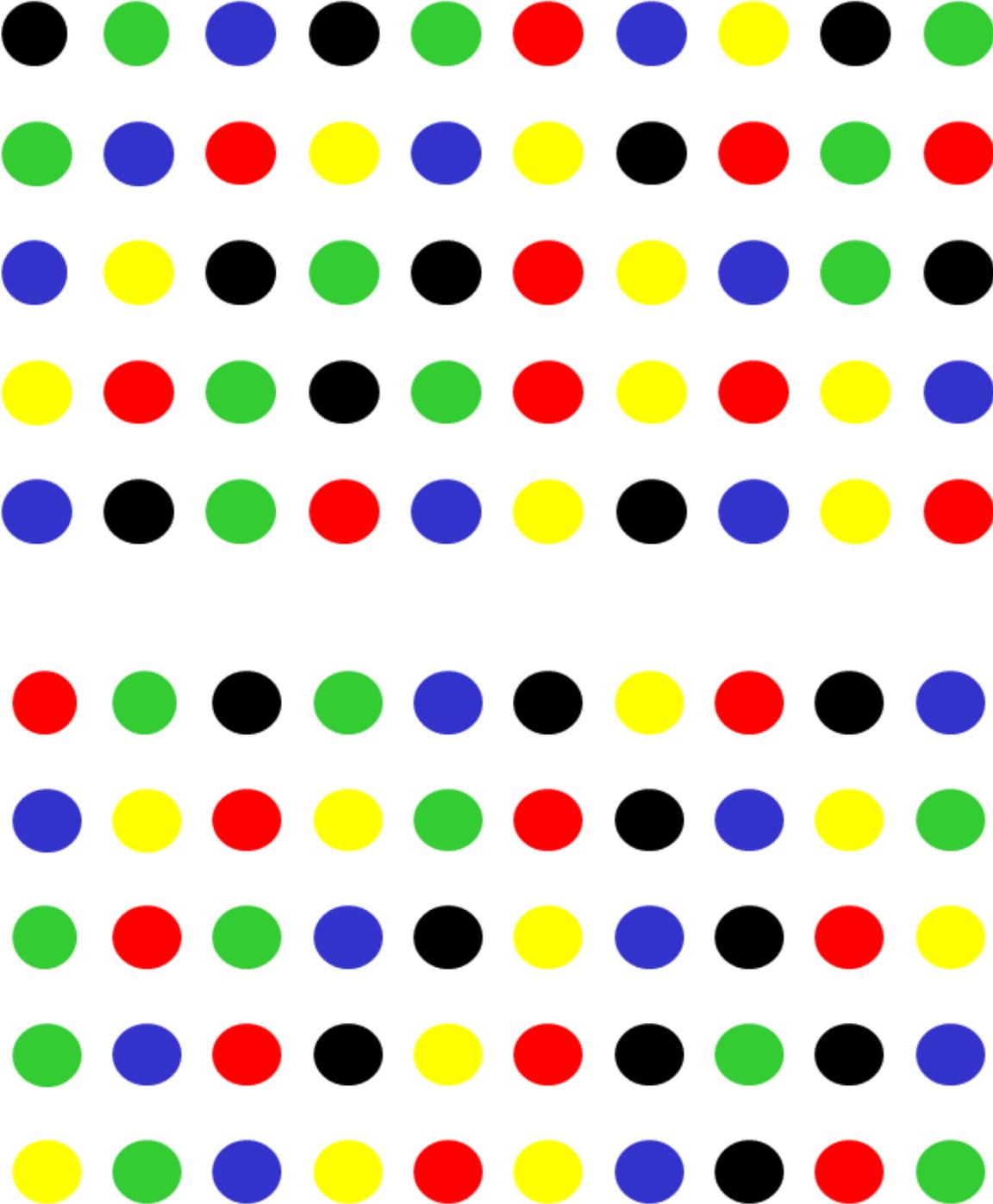


## Dénomination de chiffres

**23929 54635 55852 91549 12856 85811 45932 48431 83659 28896**

**58869 29852 24651 54919 36849 49354 26892 12463 81845 29496**

Dénomination de couleurs



## Annexe 5. Liste des items des études 1 et 2

70 mots fréquents (avec leur fréquence lexicale, le nombre de voisins orthographiques et phonologiques et la catégorie grammaticale) et 70 pseudomots.

Mots	Item	Fréquence	Voisins ortho	Voisins phono	Gram
1	Cause	188,04	6	15	NOM
2	Peine	388,24	8	26	NOM
3	Force	218,38	8	8	NOM
4	Livre	151,76	7	5	NOM
5	Belle	223,65	10	24	ADJ
6	Boire	100,27	9	14	VER
7	Genre	155,2	1	7	NOM
8	Heure	439,86	3	10	NOM
9	Verre	175,2	10	22	NOM
10	Moins	718,18	6	9	ADV
11	Terre	420,88	9	29	NOM
12	Faute	81,08	9	16	NOM
13	Libre	130,14	5	6	ADJ
14	Plein	157,84	1	12	ADJ
15	Cœur	380,07	1	13	NOM
16	Droit	138,72	1	7	NOM
17	jeune	432,64	2	4	ADJ
18	oncle	121,96	1	2	NOM
19	jouer	121,82	11	14	VER
20	haute	88,11	5	16	ADJ
21	rouge	195,27	10	13	ADJ
22	point	272,57	3	9	NOM
23	ligne	101,01	10	19	NOM
24	geste	172,03	8	10	NOM
25	blanc	152,03	1	15	ADJ
26	poche	101,82	10	16	NOM
27	grand	537,97	3	15	ADJ
28	soeur	116,55	3	15	NOM
29	corps	480,34	2	26	NOM
30	route	251,35	11	23	NOM
31	ombre	190,61	4	3	NOM
32	toute	602,84	9	22	ADJ
33	sorte	273,38	8	11	NOM
34	suite	270,88	4	8	NOM
35	pluie	111,76	3	1	NOM
36	chair	90,81	4	24	NOM

37	vingt	154,59	0	25	ADJ:num
38	juste	147,77	3	3	ADJ
39	clair	91,01	5	10	ADJ
40	porte	536,96	13	11	NOM
41	forme	137,91	10	8	NOM
42	salle	197,64	15	25	NOM
43	glace	76,01	3	10	NOM
44	chien	117,64	3	12	NOM
45	doute	341,35	14	20	NOM
46	neige	74,93	2	10	NOM
47	fille	417,03	12	19	NOM
48	trois	660,34	5	8	ADJ:num
49	front	152,57	1	15	NOM
50	table	341,08	9	9	NOM
51	doigt	80,34	0	17	NOM
52	femme	680,2	2	20	NOM
53	chose	695,2	4	12	NOM
54	jaune	75,81	4	9	ADJ
55	bonne	294,53	11	18	ADJ
56	toile	81,35	5	5	NOM
57	signe	119,19	9	16	NOM
58	tante	110,95	12	21	NOM
59	honte	82,64	7	12	NOM
60	ville	311,69	10	26	NOM
61	bruit	223,18	2	3	NOM
62	place	437,97	6	13	NOM
63	train	271,28	5	15	NOM
64	foule	101,62	15	19	NOM
65	froid	94,86	0	7	ADJ
66	vivre	186,82	5	9	VER
67	poids	89,05	2	16	NOM
68	gorge	82,64	3	1	NOM
69	monde	732,43	11	12	NOM
70	mille	142,09	11	27	ADJ:num

---

**Pseudomots**
**Item**


---

1	joine	26	Meise	51	Raure
2	aucle	27	Birve	52	Gline
3	mirce	28	Grume	53	Plinc
4	houde	29	Plunc	54	Quirn
5	phive	30	Naice	55	Floix
6	puine	31	Bluix	56	Cluve
7	slure	32	Muich	57	Truse
8	vusse	33	Guige	58	Prace
9	phuge	34	Chinc	59	Munle
10	coige	35	Posce	60	Cruge

11	dritt	36	Couge	61	Fince
12	foume	37	Banle	62	Souic
13	jaise	38	Hoice	63	Loime
14	gince	39	Oinre	64	Daice
15	choun	40	Peuge	65	Claux
16	fouce	41	Soise	66	Druin
17	loive	42	Foice	67	Bilve
18	poune	43	Fouge	68	Huige
19	sanre	44	Blone	69	Jaive
20	oicre	45	Soune	70	Tonre
21	monve	46	Luipe		
22	trice	47	Floce		
23	stine	48	Spare		
24	milve	49	Poige		
25	tanle	50	Soige		

---

### Annexe 6. Liste des items de l'étude 3

210 mots (105 mots fréquents et 105 mots rares, avec leur fréquence lexicale, le nombre de voisins orthographiques et phonologiques et la catégorie grammaticale) et 210 non-mots (70 pseudomots, 70 séquences de consonnes et 70 séquences de symboles).

Mots fréquents	Item	Fréquence	Voisins ortho	Voisins phono	Gram
1	corps	480,34	2	26	NOM
2	douze	48,18	5	10	ADJ:num
3	train	271,28	5	15	NOM
4	froid	94,86	0	7	ADJ
5	poids	89,05	2	16	NOM
6	terre	420,88	9	29	NOM
7	nuque	48,51	2	7	NOM
8	livre	151,76	7	5	NOM
9	haine	49,39	9	16	NOM
10	plein	157,84	1	12	ADJ
11	cause	188,04	6	15	NOM
12	mille	142,09	11	27	ADJ:num
13	masse	60,54	13	31	NOM
14	monde	732,43	11	12	NOM
15	heure	439,86	3	10	NOM
16	place	437,97	6	13	NOM
17	verre	175,2	10	22	NOM
18	moins	718,18	6	9	ADV
19	barbe	47,7	9	12	NOM
20	choix	51,42	7	15	NOM
21	celle	299,46	11	28	PRO:dem
22	blanc	152,03	1	15	ADJ
23	chien	117,64	3	12	NOM
24	coeur	380,07	1	13	NOM
25	grave	74,86	9	13	ADJ
26	boire	100,27	9	14	VER
27	seuil	48,85	1	10	NOM
28	porte	536,96	13	11	NOM
29	doute	341,35	14	20	NOM
30	jeune	432,64	2	4	ADJ
31	quart	57,36	3	40	NOM
32	faute	81,08	9	16	NOM
33	vaste	55,61	5	8	ADJ

34	jaune	75,81	4	9	ADJ
35	mieux	398,38	6	8	ADV
36	calme	65,81	9	16	ADJ
37	ville	311,69	10	26	NOM
38	lampe	70,88	9	16	NOM
39	clair	91,01	5	10	ADJ
40	sorte	273,38	8	11	NOM
41	forte	62,64	11	9	ADJ
42	basse	71,28	16	30	ADJ
43	douce	73,58	6	15	ADJ
44	vingt	154,59	0	25	ADJ:num
45	grand	537,97	3	15	ADJ
46	haute	88,11	5	16	ADJ
47	forme	137,91	10	8	NOM
48	soeur	116,55	3	15	NOM
49	foule	101,62	15	19	NOM
50	sueur	57,3	4	4	NOM
51	ombre	190,61	4	3	NOM
52	veste	55,68	12	13	NOM
53	trois	660,34	5	8	ADJ:num
54	table	341,08	9	9	NOM
55	poing	47,97	2	9	NOM
56	somme	72,7	8	14	NOM
57	plage	72,03	5	7	NOM
58	tante	110,95	12	21	NOM
59	toile	81,35	5	5	NOM
60	vivre	186,82	5	9	VER
61	signe	119,19	9	16	NOM
62	oncle	121,96	1	2	NOM
63	belle	223,65	10	24	ADJ
64	toute	602,84	9	22	ADJ
65	comme	365,68	9	19	ADV
66	droit	138,72	1	7	NOM
67	lueur	49,12	3	5	NOM
68	croix	71,62	4	9	NOM
69	chair	90,81	4	24	NOM
70	pluie	111,76	3	1	NOM
71	poste	73,58	8	4	NOM
72	bruit	223,18	2	3	NOM
73	route	251,35	11	23	NOM
74	geste	172,03	8	10	NOM
75	glace	76,01	3	10	NOM
76	ligne	101,01	10	19	NOM
77	doigt	80,34	0	17	NOM
78	pomme	46,08	9	16	NOM

79	juste	147,77	3	3	ADJ
80	neige	74,93	2	10	NOM
81	peine	388,24	8	26	NOM
82	chose	695,2	4	12	NOM
83	filie	417,03	12	19	NOM
84	bonne	294,53	11	18	ADJ
85	force	218,38	8	8	NOM
86	ferme	47,23	12	16	NOM
87	point	272,57	3	9	NOM
88	libre	130,14	5	6	ADJ
89	poche	101,82	10	16	NOM
90	jouer	121,82	11	14	VER
91	champ	51,76	1	24	NOM
92	gorge	82,64	3	1	NOM
93	salle	197,64	15	25	NOM
94	suite	270,88	4	8	NOM
95	rouge	195,27	10	13	ADJ
96	front	152,57	1	15	NOM
97	jambe	49,93	2	4	NOM
98	frais	56,22	7	20	ADJ
99	large	70,54	8	9	ADJ
100	femme	680,2	2	20	NOM
101	bande	52,36	7	14	NOM
102	genre	155,2	1	7	NOM
103	mince	60,34	4	13	ADJ
104	grise	49,39	9	13	ADJ
105	honte	82,64	7	12	NOM

<b>Mots rares</b>	<b>Item</b>	<b>Fréquence</b>	<b>Voisins ortho</b>	<b>Voisins phono</b>	<b>Gram</b>
1	bosse	6,82	12	22	NOM
2	groin	1,76	1	0	NOM
3	motte	2,97	10	28	NOM
4	larme	10,81	5	8	NOM
5	tuile	2,84	3	2	NOM
6	tigre	4,86	6	3	NOM
7	bille	8,58	14	23	NOM
8	veine	15,27	6	20	NOM
9	belge	6,55	5	5	ADJ
10	saine	6,15	11	28	ADJ
11	pelle	11,35	9	26	NOM
12	orque	0,07	2	7	NOM
13	pleur	0,81	2	4	NOM
14	rente	1,96	14	22	NOM
15	terne	9,73	8	17	ADJ
16	fente	10,54	10	22	NOM
17	niais	3,51	5	14	ADJ

18	laide	9,73	5	22	ADJ
19	orgue	5,41	3	8	NOM
20	firme	1,96	3	6	NOM
21	ongle	10,14	2	6	NOM
22	bulle	6,62	10	21	NOM
23	germe	2,03	10	8	NOM
24	hutte	4,93	3	18	NOM
25	loupe	4,86	10	17	NOM
26	scout	1,62	1	5	ADJ
27	chiot	1,49	0	7	NOM
28	stage	4,8	5	9	NOM
29	huche	0,34	6	15	NOM
30	ruche	2,03	8	15	NOM
31	moule	3,99	14	21	NOM
32	nacre	5,2	5	4	NOM
33	faune	5,95	5	13	NOM
34	gomme	9,26	10	14	NOM
35	saule	1,96	10	22	NOM
36	phare	10,68	1	34	NOM
37	gaule	1,89	7	18	NOM
38	dalle	13,38	9	23	NOM
39	stand	2,64	0	6	NOM
40	bagne	3,31	9	25	NOM
41	jarre	1,49	4	28	NOM
42	cygne	4,66	2	16	NOM
43	sport	15,54	2	7	NOM
44	clown	6,49	1	7	NOM
45	moite	10	9	7	ADJ
46	franc	10,95	1	15	ADJ
47	match	9,39	2	12	NOM
48	givre	5,07	3	2	NOM
49	prime	7,09	10	10	NOM
50	crabe	7,3	7	12	NOM
51	rhume	4,93	0	16	NOM
52	pause	10,14	5	8	NOM
53	farce	8,99	6	9	NOM
54	truie	2,16	1	3	NOM
55	ample	8,04	3	4	ADJ
56	figue	1,28	8	20	NOM
57	malle	10,27	11	29	NOM
58	fugue	5,68	2	10	NOM
59	fauve	7,77	4	8	NOM
60	corne	9,8	11	10	NOM
61	tract	2,5	4	6	NOM
62	ronce	1,28	7	14	NOM

63	maire	13,11	9	30	NOM
64	moche	14,32	11	20	ADJ
65	ruine	15,47	5	0	NOM
66	niche	6,35	7	15	NOM
67	hotte	2,43	7	17	NOM
68	sauce	11,76	4	16	NOM
69	valse	7,91	4	7	NOM
70	trame	5,27	10	11	NOM
71	frire	1,82	7	10	VER
72	frein	7,91	0	16	NOM
73	fosse	10,74	9	17	NOM
74	singe	15	5	7	NOM
75	prose	3,31	6	3	NOM
76	dague	1,55	7	21	NOM
77	flair	4,8	2	13	NOM
78	louve	3,51	5	13	NOM
79	lotte	0,07	11	27	NOM
80	jouet	7,03	8	15	NOM
81	mauve	10,68	3	9	ADJ
82	beige	6,82	3	12	ADJ
83	nette	14,86	8	24	ADJ
84	colle	12,77	10	26	VER
85	craie	10,2	11	21	NOM
86	gamme	5,74	4	23	NOM
87	arche	5,68	2	10	NOM
88	larve	1,69	4	5	NOM
89	hache	11,76	9	21	NOM
90	choir	6,89	5	12	VER
91	roche	14,12	11	20	NOM
92	clerc	5,68	0	10	NOM
93	coach	0	0	9	NOM
94	poire	10,81	8	13	NOM
95	louer	7,57	13	15	VER
96	biche	7,3	10	30	NOM
97	perle	7,3	11	12	NOM
98	merle	2,64	6	6	NOM
99	latte	2,03	12	29	NOM
100	prune	1,55	3	4	NOM
101	nouer	6,01	10	14	VER
102	noeud	14,46	0	24	NOM
103	phase	6,76	1	21	NOM
104	vigne	10,61	7	16	NOM
105	laque	2,09	8	25	NOM
<hr/>					
<b>Pseudomots</b>		<b>Consonnes</b>		<b>Symboles</b>	
1	joine	1	ncftv	1	¥Ꞥ£\$Ð

2	aucle	2	tscrn	2	Ɔø¥§!
3	mirce	3	svfbn	3	¶ ø-§α
4	houde	4	rtzmq	4	εø§εø
5	phive	5	mdrsc	5	£§Ɔ α
6	puine	6	nbvsr	6	ø¶ Ɔ¥
7	slure	7	fsnrn	7	α§! §Ɔ
8	vusse	8	tnrcv	8	¥ Ɔ§Ɔ
9	phuge	9	cspnr	9	Ɔðøç£
10	coige	10	grnsc	10	Ɔç¥ £
11	dritt	11	fsrmv	11	¥¶ øƆ
12	foume	12	cbrnc	12	§ç¥§α
13	jaise	13	qrcnv	13	¥Æ-§Ɔ
14	gince	14	never	14	§¥§α¥
15	choun	15	vtzsl	15	¶ Ɔαçð
16	fouce	16	dmpvc	16	ø¥-Ɔ
17	loive	17	slnrc	17	αç§
18	poune	18	bcvrc	18	¥α ø¶
19	sanre	19	nrnvc	19	¥øƆ §
20	oicre	20	gnsrc	20	£§øƆα
21	monve	21	fnrcn	21	§ð§¥α
22	trice	22	mscrν	22	α¥Ɔ§!
23	stine	23	bncvc	23	§ø Ɔç
24	milve	24	qvrnc	24	α!§ç§
25	tanle	25	nscgr	25	¥-Ɔ§ç
26	meise	26	lsrfc	26	‡§ð§Ɔ
27	birve	27	lsvcr	27	α¥ Ɔα
28	grume	28	hrzsr	28	αø§‡§
29	plunc	29	lnvsc	29	α§α¥‡
30	naice	30	revsm	30	¶¥ø¶
31	bluix	31	tnrvc	31	¥¶ £ç§
32	muich	32	glrvc	32	¥α£çα
33	guige	33	phrcv	33	ð£Æø!
34	chinc	34	bsrcn	34	¥Ɔç¥§
35	posce	35	fncvr	35	Ɔø§¥§
36	couge	36	prsvc	36	§α!Ɔ§
37	banle	37	srvcn	37	øÆ-Ɔ§
38	hoice	38	lsrcn	38	ç!α§¥
39	oinre	39	pnvrs	39	ð§£ç¶
40	peuge	40	dscnv	40	§¶ Ɔαç
41	soise	41	psrnv	41	ð§Ɔ£α
42	foice	42	trtbn	42	¥§-ð
43	fouge	43	lncsv	43	£-øç¥
44	blone	44	rnvfs	44	§α£ç§
45	soune	45	rnvcs	45	α¶ ¥£ð
46	luipe	46	grcnv	46	Ɔç¥§!

47	floce	47	svenc	47	ð æD¶
48	spare	48	nrcvc	48	ð§¥ ç
49	poige	49	nvrsc	49	§æ§ ¥
50	soige	50	gscvr	50	‡Ø æ¥
51	raure	51	lsvcv	51	æØ-Þ
52	gline	52	tncvs	52	¶ Ø£§ð
53	plinc	53	rnfbc	53	§ð‡Ø£
54	quirn	54	ncdtr	54	æ*ØÆ
55	floix	55	csvrn	55	§D ¶ð
56	cluve	56	bsnvc	56	£-D§ð
57	truse	57	nvprs	57	æðç§
58	prace	58	dnlvc	58	D¶ æ§Þ
59	munle	59	srmv	59	‡çÆ §
60	cruge	60	bcvnr	60	æ¥ §¶
61	fince	61	cvsnc	61	£§ çð
62	souic	62	trenv	62	Þ‡§-ç
63	loime	63	neves	63	ð§£æ¥
64	daice	64	brcsv	64	æDð
65	claux	65	gnvsc	65	§ð§ç£
66	druin	66	rpsrv	66	ðÞ‡ØÞ
67	bilve	67	gsvnc	67	D§æ§ç
68	huige	68	trcvr	68	¥§ ØD
69	jaive	69	rsnvc	69	§æ¥¶
70	tonre	70	dspnv	70	æ§ç£§

## Annexe 7. Liste des items de l'étude 4

Liste des 360 mots, en fonction de la présence ou non de la lettre cible, la longueur et la position de la lettre cible (avec leur fréquence lexicale, le nombre de voisins orthographiques et phonologiques, la catégorie grammaticale et le nombre de syllabes).

	Nombre Lettres	Position Cible	Item	Fréquence	Voisins ortho	Voisins phono	Gram	Nombre Syllabes	
<b>Lettre cible présente</b>									
a	4	Début	1	allé	57,3	5	31	VER	2
a	4	Début	2	avis	65,14	5	16	NC	2
a	4	Début	3	taxi	41,22	6	5	NC	2
a	4	Début	4	salé	3,38	9	24	ADJ	2
a	4	Début	5	ravi	11,42	4	10	VER	2
a	4	Début	6	café	154,93	6	19	NC	2
a	4	Début	7	mari	118,38	17	31	NC	2
a	4	Début	8	dame	106,15	13	21	NC	1
a	4	Début	9	lavé	8,38	11	18	VER	2
e	4	Début	10	venu	135,14	6	9	VER	2
e	4	Début	11	ceci	53,78	0	3	PRO	2
e	4	Début	12	menu	12,03	6	9	NC	2
e	4	Début	13	tenu	54,12	4	8	VER	2
e	4	Début	14	reçu	56,15	4	12	VER	2
e	4	Début	15	test	2,91	3	10	NC	1
i	4	Début	16	idée	241,08	0	10	NC	2
i	4	Début	17	film	49,53	4	10	NC	1
i	4	Début	18	tige	11,15	7	13	NC	1
i	4	Début	19	tiré	53,04	6	25	VER	2
i	4	Début	20	kilo	5,27	4	9	NC	2
i	4	Début	21	fixé	25,14	6	6	VER	2
i	4	Début	22	fine	33,99	14	25	ADJ	1
o	4	Début	23	oser	11,49	4	13	VER	2
o	4	Début	24	bord	197,36	9	27	NC	1
o	4	Début	25	poli	9,53	6	11	ADJ	2
o	4	Début	26	volé	19,26	7	15	VER	2
o	4	Début	27	posé	69,26	7	16	VER	2
o	4	Début	28	doré	15,74	12	15	ADJ	2
o	4	Début	29	robe	111,96	7	16	NC	1
o	4	Début	30	rose	66,62	12	12	ADJ	1
a	4	Fin	1	gras	25,61	10	18	ADJ	1
a	4	Fin	2	drap	33,18	2	14	NC	1

a	4	Fin	3	plat	44,26	7	16	NC	1
a	4	Fin	4	égal	20,27	1	3	ADJ	2
a	4	Fin	5	oral	2,7	0	5	NC	2
a	4	Fin	6	état	192,03	5	10	NC	2
e	4	Fin	7	chef	172,57	3	11	NC	1
e	4	Fin	8	amer	11,69	3	15	ADJ	2
e	4	Fin	9	ôter	10	2	19	VER	2
e	4	Fin	10	lune	63,24	10	11	NC	1
e	4	Fin	11	cape	10,34	17	34	NC	1
e	4	Fin	12	sage	23,45	10	18	ADJ	1
e	4	Fin	13	amie	54,32	2	16	NC	2
e	4	Fin	14	asie	20,90			NP	2
e	4	Fin	15	rire	112,57	20	24	NC	1
i	4	Fin	16	agir	29,66	3	8	VER	2
i	4	Fin	17	gris	88,31	12	14	ADJ	1
i	4	Fin	18	demi	55,2	1	5	ADV	2
i	4	Fin	19	muni	6,62	4	5	VER	2
i	4	Fin	20	pari	4,59	16	29	NC	2
i	4	Fin	21	rôti	2,3	1	10	NC	2
i	4	Fin	22	puni	3,99	3	5	VER	2
i	4	Fin	23	joli	44,53	3	8	ADJ	2
o	4	Fin	24	bloc	28,31	6	8	NC	1
o	4	Fin	25	stop	6,49	1	6	NC	1
o	4	Fin	26	écho	32,5	1	6	NC	2
o	4	Fin	27	vélo	24,32	1	7	NC	2
o	4	Fin	28	auto	30,34	1	13	NC	2
o	4	Fin	29	zéro	16,49	2	4	NC	2
o	4	Fin	30	judo	1,22	0	3	NC	2
a	6	Début	1	argent	194,32	4	7	NC	2
a	6	Début	2	acteur	15,47	1	1	NC	2
a	6	Début	3	panier	24,39	7	6	NC	2
a	6	Début	4	patron	93,85	1	11	NC	2
a	6	Début	5	marche	58,38	4	14	NC	1
a	6	Début	6	flamme	38,38	3	10	NC	1
a	6	Début	7	chaton	2,5	3	17	NC	2
a	6	Début	8	statue	25,54	3	1	NC	2
e	6	Début	9	espoir	90,74	0	0	NC	2
e	6	Début	10	esprit	182,84	0	0	NC	2
e	6	Début	11	debout	158,85	0	1	ADV	2
e	6	Début	12	devoir	33,04	1	1	NC	2
e	6	Début	13	revoir	43,85	6	4	VER	2
e	6	Début	14	retard	43,45	2	10	NC	2
e	6	Début	15	chemin	197,5	0	2	NC	2
i	6	Début	16	visage	490,54	2	3	NC	2
i	6	Début	17	minute	60,74	1	2	NC	2

i	6	Début	18	citron	9,05	2	9	NC	2
i	6	Début	19	pilote	5,61	5	8	NC	2
i	6	Début	20	grille	43,85	7	13	NC	1
i	6	Début	21	grippe	4,86	5	12	NC	1
i	6	Début	22	prince	65,61	1	3	NC	1
o	6	Début	23	orange	12,03	5	7	NC	2
o	6	Début	24	coffre	25,14	1	3	NC	1
o	6	Début	25	voleur	11,15	2	3	NC	2
o	6	Début	26	dormir	95,2	2	2	VER	2
o	6	Début	27	copain	34,05	0	7	NC	2
o	6	Début	28	moteur	41,28	2	10	NC	2
o	6	Début	29	proche	10,27	5	9	NC	1
o	6	Début	30	projet	39,86	1	6	NC	2
a	6	Fin	1	girafe	1,89	0	0	NC	2
a	6	Fin	2	regard	354,93	2	5	NC	2
a	6	Fin	3	pétale	1,42	5	9	NC	2
a	6	Fin	4	signal	18,72	1	5	NC	2
a	6	Fin	5	soldat	46,22	1	2	NC	2
a	6	Fin	6	normal	42,97	0	0	ADJ	2
a	6	Fin	7	verbal	1,89	1	1	ADJ	2
e	6	Fin	8	porter	79,93	5	3	VER	2
e	6	Fin	9	poulet	14,53	5	19	NC	2
e	6	Fin	10	causer	18,31	5	19	VER	2
e	6	Fin	11	humide	38,24	1	0	ADJ	2
e	6	Fin	12	tomate	5,74	0	1	NC	2
e	6	Fin	13	volume	16,35	1	2	NC	2
e	6	Fin	14	cloche	18,24	3	8	NC	1
e	6	Fin	15	chaise	86,35	2	15	NC	1
i	6	Fin	16	cerise	3,31	1	1	NC	2
i	6	Fin	17	navire	28,04	0	5	NC	2
i	6	Fin	18	police	81,69	1	6	NC	2
i	6	Fin	19	public	37,91	3	0	NC	2
i	6	Fin	20	bougie	16,22	5	11	NC	2
i	6	Fin	21	sortie	66,01	4	5	NC	2
i	6	Fin	22	sentir	74,19	5	10	VER	2
i	6	Fin	23	rempli	16,82	0	1	VER	2
o	6	Fin	24	miroir	48,58	1	4	NC	2
o	6	Fin	25	parole	81,82	2	3	NC	2
o	6	Fin	26	effort	98,18	0	3	NC	2
o	6	Fin	27	accord	124,66	2	11	NC	2
o	6	Fin	28	trésor	20,14	0	0	NC	2
o	6	Fin	29	castor	1,08	0	1	NC	2
o	6	Fin	30	tricot	11,96	2	7	NC	2
a	8	Début	1	assiette	36,28	0	2	NC	2
a	8	Début	2	laquelle	182,36	0	4	PRO	2

a	8	Début	3	baguette	9,46	0	4	NC	2
a	8	Début	4	cachette	14,59	4	14	NC	2
a	8	Début	5	patience	32,97	1	1	NC	2
a	8	Début	6	chasseur	23,58	1	7	NC	2
a	8	Début	7	chapitre	35,81	1	1	NC	2
a	8	Début	8	remarque	16,22	3	3	NC	2
e	8	Début	9	rentrant	21,49	3	5	VER	2
e	8	Début	10	semblant	14,59	2	6	VER	2
e	8	Début	11	pleuvoir	6,69	0	0	VER	2
e	8	Début	12	pleurant	7,16	4	4	VER	2
e	8	Début	13	perchoir	3,58	0	0	NC	2
e	8	Début	14	question	232,5	0	3	NC	2
i	8	Début	15	immeuble	50,88	0	0	NC	2
i	8	Début	16	dimanche	87,84	1	1	NC	2
i	8	Début	17	richesse	14,66	0	1	NC	2
i	8	Début	18	vignette	0,41	0	1	NC	2
i	8	Début	19	fillette	16,69	2	6	NC	2
i	8	Début	20	distance	52,64	2	3	NC	2
i	8	Début	21	discours	50,54	3	1	NC	2
o	8	Début	22	obstacle	14,12	0	0	NC	2
o	8	Début	23	tonnerre	18,65	0	5	NC	2
o	8	Début	24	novembre	33,04	0	0	NC	2
o	8	Début	25	possible	197,16	1	1	ADJ	2
o	8	Début	26	commerce	29,05	2	0	NC	2
o	8	Début	27	promesse	21,76	2	3	NC	2
o	8	Début	28	scolaire	9,66	1	1	ADJ	2
o	8	Début	29	nocturne	25,41	0	0	ADJ	2
o	8	Début	30	sommaire	3,45	0	8	NC	2
a	8	Fin	1	montagne	49,8	0	2	NC	2
a	8	Fin	2	gendarme	16,15	0	0	NC	2
a	8	Fin	3	coupable	7,3	0	1	NC	2
a	8	Fin	4	moutarde	4,93	3	3	NC	2
a	8	Fin	5	centrale	15,34	2	2	ADJ	2
a	8	Fin	6	tournage	2,36	0	1	NC	2
a	8	Fin	7	grillage	9,59	2	4	NC	2
e	8	Fin	8	suiivante	19,46	1	0	ADJ	2
e	8	Fin	9	couronne	12,5	3	2	NC	2
e	8	Fin	10	autruche	2,43	0	0	NC	2
e	8	Fin	11	aiguille	18,38	3	0	NC	2
e	8	Fin	12	coquille	9,46	1	1	NC	2
e	8	Fin	13	fourrure	16,89	0	7	NC	2
e	8	Fin	14	mauvaise	70,88	0	0	ADJ	2
e	8	Fin	15	campagne	94,73	1	3	NC	2
e	8	Fin	16	conduire	40,27	3	2	VER	2
i	8	Fin	17	tourisme	4,66	1	0	NC	2

i	8	Fin	18	réplique	12,77	2	1	NC	2
i	8	Fin	19	sorcière	6,42	0	0	NC	2
i	8	Fin	20	gentille	18,31	1	2	ADJ	2
i	8	Fin	21	boutique	36,01	1	5	NC	2
i	8	Fin	22	chenille	2,5	2	3	NC	2
i	8	Fin	23	terrible	73,24	0	0	ADJ	2
i	8	Fin	24	surprise	68,51	1	2	NC	2
o	8	Fin	25	approche	22,3	2	1	NC	2
o	8	Fin	26	quatorze	22,09	0	0	ADJ	2
o	8	Fin	27	dialogue	14,46	1	0	NC	2
o	8	Fin	28	personne	145,95	0	1	NC	2
o	8	Fin	29	carrosse	3,72	0	8	NC	2
o	8	Fin	30	marmotte	0,74	4	4	NC	2

### Lettre cible absente

a	4		1	vécu	56,62	1	4	VER	2
a	4		2	rêvé	20,88	3	8	VER	2
a	4		3	cité	20,68	11	19	NC	2
a	4		4	levé	40,41	3	8	VER	2
a	4		5	mine	48,18	19	19	NC	1
a	4		6	épée	19,12	1	14	NC	2
a	4		7	télé	25,27	5	11	NC	2
a	4		8	code	13,58	10	17	NC	1
a	4		9	ogre	4,66	1	4	NC	1
a	4		10	mode	46,96	7	14	NC	1
a	4		11	moto	15,27	10	15	NC	2
a	4		12	midi	68,11	3	8	NC	2
a	4		13	fini	149,26	4	5	VER	2
a	4		14	bébé	36,22	1	9	NC	2
a	4		15	sept	75,61	3	32	ADJ	1
e	4		16	iris	6,42	9	10	NC	2
e	4		17	sali	2,36	12	23	VER	2
e	4		18	aval	3,99	1	6	NC	2
e	4		19	paru	34,12	9	15	VER	2
e	4		20	coco	6,08	5	14	NC	2
e	4		21	azur	9,39	0	7	NC	2
e	4		22	flot	29,59	8	13	NC	1
e	4		23	loto	1,15	9	12	NC	2
e	4		24	lard	11,01	10	33	NC	1
e	4		25	choc	37,57	4	16	NC	1
e	4		26	sort	57,5	10	22	NC	1
e	4		27	abri	51,08	1	4	NC	2
e	4		28	parc	38,72	10	15	NC	1
e	4		29	fort	43,85	12	20	ADJ	1
e	4		30	papa	77,16	9	18	NC	2

i	4	31	semé	6,08	2	6	VER	2
i	4	32	raté	7,7	11	28	VER	2
i	4	33	géné	11,42	2	10	ADJ	2
i	4	34	payé	23,24	11	19	VER	2
i	4	35	vexé	4,19	2	5	VER	2
i	4	36	duré	13,85	8	13	VER	2
i	4	37	acte	35,88	6	14	NC	1
i	4	38	rame	5,74	21	26	NC	1
i	4	39	pâté	11,01	8	34	NC	2
i	4	40	tube	11,35	7	16	NC	1
i	4	41	base	31,96	14	28	NC	1
i	4	42	jupe	34,05	5	8	NC	1
i	4	43	cage	34,86	15	24	NC	1
i	4	44	côté	497,43	4	28	NC	2
i	4	45	déjà	702,23	0	4	ADV	2
o	4	46	armé	8,31	5	11	VER	2
o	4	47	gelé	3,04	3	6	ADJ	2
o	4	48	têtu	5,14	3	12	ADJ	2
o	4	49	vêtu	26,96	3	7	VER	2
o	4	50	rusé	2,77	6	9	ADJ	2
o	4	51	mémé	34,39	2	4	NC	2
o	4	52	nage	6,22	11	13	NC	1
o	4	53	file	21,49	15	27	NC	1
o	4	54	lame	25,81	13	20	NC	1
o	4	55	jeté	45,07	3	8	VER	2
o	4	56	judge	29,8	6	8	NC	1
o	4	57	rare	37,23	20	35	ADJ	1
o	4	58	case	9,46	18	30	NC	1
o	4	59	vase	26,76	9	17	NC	1
o	4	60	cela	741,82	4	9	PRO	2
a	6	1	refuge	16,89	1	1	NC	2
a	6	2	coller	12,36	8	22	VER	2
a	6	3	timide	19,53	0	1	ADJ	2
a	6	4	brosse	16,01	5	8	NC	1
a	6	5	flèche	15,54	3	9	NC	1
a	6	6	dictée	3,51	1	6	NC	2
a	6	7	disque	21,49	2	5	NC	1
a	6	8	grotte	17,84	5	10	NC	1
a	6	9	rocher	17,5	8	16	NC	2
a	6	10	désert	36,76	1	5	NC	2
a	6	11	secret	70,81	1	4	NC	2
a	6	12	visite	80,61	2	1	NC	2
a	6	13	modèle	27,5	2	4	NC	2
a	6	14	rester	123,78	7	9	VER	2
a	6	15	colère	92,77	2	21	NC	2

e	6	16	surgir	17,84	3	2	VER	2
e	6	17	massif	7,64	1	4	NC	2
e	6	18	glaçon	0,95	0	9	NC	2
e	6	19	brutal	15,47	0	0	ADJ	2
e	6	20	climat	17,16	1	2	NC	2
e	6	21	bavard	2,57	3	9	ADJ	2
e	6	22	combat	52,36	1	10	NC	2
e	6	23	calcul	11,55	0	0	NC	2
e	6	24	propos	106,28	5	4	NC	2
e	6	25	offrir	50,34	2	0	VER	2
e	6	26	hasard	118,99	2	10	NC	2
e	6	27	crayon	25,47	2	8	NC	2
e	6	28	canard	16,15	6	13	NC	2
e	6	29	sortir	145,34	4	2	VER	2
e	6	30	partir	167,77	5	6	VER	2
i	6	31	calmer	14,66	9	10	VER	2
i	6	32	charge	36,08	5	9	NC	1
i	6	33	manège	13,51	1	2	NC	2
i	6	34	berger	11,15	5	4	NC	2
i	6	35	épaule	116,96	2	2	NC	2
i	6	36	placer	21,69	5	13	VER	2
i	6	37	garage	22,23	3	6	NC	2
i	6	38	former	15,95	6	8	VER	2
i	6	39	barque	29,93	5	15	NC	1
i	6	40	caler	48,45	9	29	VER	2
i	6	41	salade	15,41	4	6	NC	2
i	6	42	cabane	25,68	5	3	NC	2
i	6	43	espace	78,58	2	2	NC	2
i	6	44	malade	66,22	5	6	ADJ	2
i	6	45	renard	8,58	3	3	NC	2
o	6	46	limite	21,76	3	3	NC	2
o	6	47	légume	2,09	1	0	NC	2
o	6	48	flaque	10,07	2	13	NC	1
o	6	49	ménage	29,26	4	5	NC	2
o	6	50	banane	4,05	3	3	NC	2
o	6	51	pirate	1,69	1	2	NC	2
o	6	52	cercle	42,43	1	1	NC	1
o	6	53	mesure	112,16	4	1	NC	2
o	6	54	valise	47,43	3	3	NC	2
o	6	55	paquet	62,77	6	24	NC	2
o	6	56	garder	68,31	9	10	VER	2
o	6	57	nature	93,45	3	4	NC	2
o	6	58	facile	88,65	0	3	ADJ	2
o	6	59	rapide	53,99	3	3	ADJ	2
o	6	60	cirque	18,38	1	12	NC	1

a	8	1	proverbe	2,64	0	0	NC	2
a	8	2	grosneur	2,57	1	4	NC	2
a	8	3	rubrique	5	1	1	NC	2
a	8	4	blessure	19,39	0	0	NC	2
a	8	5	cheville	8,99	2	1	NC	2
a	8	6	cycliste	3,65	1	0	NC	2
a	8	7	ministre	61,01	1	1	NC	2
a	8	8	sonnette	14,12	3	9	NC	2
a	8	9	consonne	0,07	0	3	NC	2
a	8	10	horrible	20,74	0	3	ADJ	2
a	8	11	problème	55,2	0	0	NC	2
a	8	12	deuxième	58,58	0	2	ADJ	2
a	8	13	répondre	98,58	2	7	VER	2
a	8	14	complète	18,18	1	4	ADJ	2
a	8	44	dernière	145,27	1	0	ADJ	2
e	8	16	marquant	5,2	4	9	VER	2
e	8	17	glissant	13,51	3	7	VER	2
e	8	18	souffrir	40,41	2	1	VER	2
e	8	19	bouillir	4,93	2	1	VER	2
e	8	20	brillant	16,62	7	17	ADJ	2
e	8	21	franchir	22,36	4	4	VER	2
e	8	22	charmant	19,86	2	10	ADJ	2
e	8	23	parcours	17,64	3	0	NC	2
e	8	24	marchant	24,86	3	6	VER	2
e	8	25	prochain	21,96	0	0	ADJ	2
e	8	26	portrait	39,19	0	5	NC	2
e	8	27	football	6,28	0	0	NC	2
e	8	28	trottoir	70,54	1	1	NC	2
e	8	29	marchand	24,12	1	6	NC	2
e	8	30	pourquoi	185,54	0	1	ADV	2
i	8	31	détresse	18,38	0	2	NC	2
i	8	32	terrasse	61,15	3	3	NC	2
i	8	33	chapelle	32,36	1	4	NC	2
i	8	34	raquette	1,69	5	10	NC	2
i	8	35	tracteur	5,27	1	0	NC	2
i	8	36	commande	12,64	3	5	NC	2
i	8	37	prudence	19,32	1	1	NC	2
i	8	38	souffler	13,65	3	6	VER	2
i	8	39	descente	20,81	1	9	NC	2
i	8	40	cachette	14,59	4	14	NC	2
i	8	41	profonde	37,97	1	0	ADJ	2
i	8	42	baguette	9,46	0	4	NC	2
i	8	43	décembre	31,15	2	3	NC	2
i	8	15	nouvelle	130,81	0	2	ADJ	2
i	8	45	chercher	172,36	2	6	VER	2

o	8	46	démarche	25,07	2	7	NC	2
o	8	47	sinistre	19,86	2	1	ADJ	2
o	8	48	physique	27,5	0	1	ADJ	2
o	8	49	paisible	27,84	1	1	ADJ	2
o	8	50	cassette	4,05	2	15	NC	2
o	8	51	pratique	10,54	2	1	ADJ	2
o	8	52	crinière	8,92	0	0	NC	2
o	8	53	pareille	41,22	0	2	ADJ	2
o	8	54	curieuse	17,23	1	1	ADJ	2
o	8	55	barrière	17,36	1	6	NC	2
o	8	56	quarante	43,78	0	9	ADJ	2
o	8	57	dentiste	4,93	0	0	NC	2
o	8	58	cartable	9,32	0	0	NC	2
o	8	59	derrière	349,39	2	3	PRE	2
o	8	60	première	296,76	0	0	ADJ	2

---

# **La reconnaissance visuelle des mots chez le dyslexique: Implication des voies ventrale et dorsale**

L'objectif de ces travaux a été d'étudier, à partir des potentiels évoqués, l'implication des voies ventrale (qui sous-tend le traitement expert de l'écrit) et dorsale (qui sous-tend des processus phonologiques et attentionnels) lors de la reconnaissance visuelle des mots chez des adultes dyslexiques. Les spécificités des sujets dyslexiques ont été isolées en les comparant à deux groupes contrôles, appariés sur : l'âge (i.e., des lecteurs experts) et sur le niveau de lecture (i.e., des mauvais lecteurs). Les résultats montrent des déficits du traitement expert de l'écrit, phonologiques et de la détection du conflit spécifiques aux sujets dyslexiques. Nos données montrent aussi des déficits du traitement expert des mots familiers et d'orientation de l'attention communs aux sujets dyslexiques et mauvais lecteurs. Les résultats sont discutés dans le cadre du modèle LCD, de la théorie du mapping phonologique et d'une implication précoce de l'orientation attentionnelle dans la lecture.

Mots clés : Reconnaissance visuelle des mots, dyslexie développementale, voie ventrale, voie dorsale, expertise de l'écrit, attention visuo-spatiale, décodage phonologique, potentiels évoqués.

The aim of this project was to examine with event related potentials ventral (involved in expertise for print) and dorsal (involved in phonological and attentional processes) pathways implication in visual word recognition in dyslexic adults. The specificity of dyslexics was determined by comparing them to age-matched controls (i.e., expert readers) and reading-level matched controls (i.e., poor readers). Results showed impaired expertise for print, decoding abilities and conflict detection which were specific to dyslexics. Our data also revealed impaired expertise for familiar words and attention orienting in both dyslexics and poor readers. Results are discussed in the context of the LCD model, the phonological mapping theory and an early involvement of attention orienting in reading.

Key words: Visual word recognition, developmental dyslexia, ventral stream, dorsal stream, expertise for print, visuo-spatial attention, phonological decoding, event related potentials