



**HAL**  
open science

# Explorations des représentations sensorimotrices chez les enfants dyslexiques

Héloïse Bordier, Clémence Desbordes

► **To cite this version:**

Héloïse Bordier, Clémence Desbordes. Explorations des représentations sensorimotrices chez les enfants dyslexiques. Sciences du Vivant [q-bio]. 2021. dumas-03347803

**HAL Id: dumas-03347803**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03347803>**

Submitted on 17 Sep 2021

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

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



Faculté des sciences  
médicales et paramédicales  
Aix\*Marseille Université

*Centre de Formation Universitaire en Orthophonie de Marseille*

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du Certificat de Capacité  
d'Orthophoniste

**EXPLORATION  
DES REPRESENTATIONS SENSORIMOTRICES  
CHEZ LES ENFANTS DYSLEXIQUES**

Héloïse Bordier et Clémence Desbordes

Sous la direction de Christine Assaiante

10 juin 2021



## **REMERCIEMENTS**

A Christine Assaiante, notre directrice de mémoire, de nous avoir fait confiance en nous proposant ce sujet et de nous avoir accompagnées durant ces deux années universitaires. Merci pour votre encadrement, votre écoute et votre disponibilité.

A Marjorie Arzoumanian, membre du jury et enseignante en langage écrit au centre d'Orthophonie de Marseille, pour l'intérêt porté à ce travail et d'en permettre la soutenance.

A Rébecca Marchetti et Marianne Vaugoyeau pour leur aide précieuse dans l'élaboration du protocole expérimental et l'analyse des résultats.

Un grand merci aux orthophonistes qui nous ont aidées au recrutement des sujets.

Aux enfants qui ont participé avec enthousiasme à cette étude ainsi qu'à leurs parents, qui ont permis que cette étude soit possible.

A nos amies et collègues de promotion, avec lesquelles nous avons partagé ces 5 années d'études.

A nos parents, de nous avoir permis de réaliser ces études et plus largement à nos familles et à nos amis pour leur présence, leur confiance et leurs encouragements.

## TABLE DES MATIERES

<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>6</b>
<b>I. Etat des lieux sur la dyslexie développementale.....</b>	<b>7</b>
<b>1) Définition de la dyslexie .....</b>	<b>7</b>
<b>2) Prévalence de la dyslexie .....</b>	<b>7</b>
<b>3) Facteurs de risque des troubles de la lecture .....</b>	<b>7</b>
3.1 Influence du milieu socio-culturel.....	7
3.2 Influence du genre .....	8
3.3 Influence des troubles du langage oral .....	8
3.4 Influence génétique .....	9
3.5 Autres influences ? .....	9
<b>4) Les troubles spécifiques de la dyslexie développementale .....</b>	<b>10</b>
4.1 Rôle du modèle à double voie de lecture.....	10
4.2 Rôle des modèles connexionnistes .....	11
4.3 Des sous-types de dyslexie ? .....	12
4.4 Le poids des déficits phonologiques dans la dyslexie développementale .....	13
4.5 Explication des autres déficits retrouvés dans la dyslexie de surface .....	14
4.6 L'utilisation des stratégies compensatoires et la dyslexie développementale .....	14
<b>5) Une abondance de comorbidités.....</b>	<b>14</b>
5.1 Les « syndromes dys » .....	15
5.2 Dyslexie et dysorthographe .....	15
5.3 Dyslexie et le trouble déficit de l'attention avec ou sans hyperactivité (TDAH) .....	15
5.4 Dyslexie et dyscalculie .....	16
5.5 Dyslexie et le trouble spécifique du langage (SLI) .....	16
5.6 Dyslexie et dyspraxie .....	16
5.7 Dyslexie et dysgraphie .....	17
5.1 Dyslexie et dyschronie .....	17
<b>6) Troubles psychoaffectifs associés aux troubles d'apprentissage.....</b>	<b>17</b>
<b>7) Evolution .....</b>	<b>18</b>
7.1 La persistance des difficultés de lecture.....	18
7.2 Conséquences scolaires, universitaires et professionnelles de la dyslexie.....	18
<b>8) Théories explicatives.....</b>	<b>19</b>
8.1 Bases neurales de l'hypothèse dyslexique de la dyslexie chez l'enfant et chez l'adulte .....	19
8.2 Hypothèses auditives à l'origine de la dyslexie .....	20
8.3 Hypothèses visuelles à l'origine de la dyslexie.....	22
8.4 Les théories du trouble du traitement temporel global .....	24
8.5 De la théorie cérébelleuse à la théorie procédurale .....	24
8.6 En résumé .....	26
<b>II. Les représentations sensorimotrices.....</b>	<b>27</b>
<b>1) Schéma corporel et représentations internes .....</b>	<b>27</b>
1.1 Rôle de l'intégration multisensorielle .....	27
1.2 La théorie des modèles internes .....	28
1.2.1 <i>Le modèle interne inverse.....</i>	28
1.2.2 <i>Le modèle interne prédictif.....</i>	28
1.2.3 <i>Les ajustements posturaux anticipés (APA) .....</i>	29
1.3 Développement du schéma corporel et des représentations sensorimotrices : .....	29
1.4 Substrats neuronaux impliqués dans les modèles internes .....	30
1.5 Cas de pathologies entraînant des déficits de représentations sensorimotrices.....	31
<b>2) Imagerie motrice : .....</b>	<b>31</b>
2.1 Simulation mentale d'une action .....	32
2.2 Couplage perception-action.....	32
2.3 Substrats neuronaux communs à l'exécution et la stimulation de l'action .....	33
2.3.1 <i>Implication du cortex moteur primaire .....</i>	33

2.3.2	<i>Implication du striatum</i> .....	33
2.3.3	<i>Implication du cervelet</i> .....	34
2.3.4	<i>Implication du cortex prémoteur et de l'aire motrice supplémentaire (SMA)</i> .....	34
2.3.5	<i>Implication des cortex pariétal postérieur et préfrontal</i> .....	34
<b>3)</b>	<b>Les liens entre la motricité et le langage</b> .....	<b>35</b>
3.1	Les neurones miroirs dans la perception de la parole .....	35
3.2	La théorie de la perception de la parole pour le contrôle de l'action .....	35
3.3	Rôle facilitateur de la pré-activation de la modalité sensorielle dans le traitement de l'information linguistique .....	35
	<b>PROBLEMATIQUE</b> .....	<b>36</b>
	<b>METHODE</b> .....	<b>36</b>
<b>1)</b>	<b>Population</b> .....	<b>36</b>
<b>2)</b>	<b>Matériel</b> .....	<b>37</b>
2.1	Paradigme de chronométrie mentale .....	37
2.2	MABC-2 .....	38
<b>3)</b>	<b>Protocole expérimental</b> .....	<b>39</b>
<b>4)</b>	<b>Méthodologie d'analyse statistique</b> .....	<b>39</b>
	<b>RESULTATS</b> .....	<b>40</b>
<b>1)</b>	<b>Paradigme de chronométrie mentale</b> .....	<b>40</b>
1.1	Les enfants avec des troubles des apprentissages ralentissent-ils leurs temps d'exécution ? .....	40
1.2	Les enfants avec des troubles des apprentissages présentent-ils plus de variabilité dans leurs temps d'exécution ? .....	41
1.3	Absence ou présence d'isochronie dans nos groupes .....	42
1.3.1	<i>Enfants contrôles</i> .....	42
1.3.2	<i>Enfants avec troubles DYS</i> .....	42
1.4	Indice d'Imagerie Motrice (IM) : Comparaison des deux groupes .....	43
1.5	En résumé .....	44
<b>2)</b>	<b>MABC-2</b> .....	<b>44</b>
2.1	Analyse quantitative .....	44
2.1	Analyse qualitative .....	45
	<b>DISCUSSION</b> .....	<b>45</b>
<b>1)</b>	<b>Interprétation des résultats du paradigme de chronométrie mentale</b> .....	<b>45</b>
<b>2)</b>	<b>Interprétation des résultats du MABC-2</b> .....	<b>47</b>
<b>3)</b>	<b>Limites</b> .....	<b>47</b>
	<b>CONCLUSION ET PERSPECTIVES</b> .....	<b>48</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>49</b>
	<b>ANNEXES</b> .....	<b>49</b>
	<b>ABSTRACT</b> .....	<b>72</b>

## **INTRODUCTION**

A la lecture de cette introduction de mémoire vous êtes probablement assis, et il vous est possible de vous représenter mentalement la manière dont sont positionnées vos jambes bien qu'elles ne soient pas dans votre champ visuel. Vous êtes en mesure de faire cela grâce aux représentations internes que vous vous faites de votre propre corps. Egaleme nt appelées les représentations sensorimotrices, elles impliquent l'activation de différents réseaux corticaux et sous-corticaux (Assaiante et al., 2014). Nous les utilisons inconsciemment et en permanence que ce soit dans nos actes de la vie quotidienne ou lors d'une tâche d'apprentissage. Elles nous sont indispensables pour adapter nos mouvements aux contraintes exo-corporelles. En effet, elles sont constamment réactualisées pour s'adapter à l'environnement mouvant dans lequel nous évoluons. Si la qualité ou la réactualisation de ces représentations se retrouvaient altérées, une éventuelle perturbation au niveau de certaines acquisitions, comme la lecture, pourrait se manifester.

Actuellement, la littérature scientifique s'accorde sur le fait que la dyslexie serait causée par un trouble phonologique. Cependant, pour certains auteurs le trouble de la lecture ne serait que la partie visible de « l'iceberg ». La dyslexie serait la conséquence d'un déficit plus général, qui ne serait pas spécifique au langage. En effet la co-occurrence de troubles observée au sein des pathologies neurodéveloppementales semble représenter la règle plutôt que l'exception (Kaplan et al., 1998). Parmi les explications avancées, une altération du cervelet pourrait être impliquée dans certains cas de dyslexie, notamment ceux s'accompagnant de troubles sensorimoteurs comme la dyspraxie (Nicolson et al., 2001). Effectivement, en plus de son implication dans la motricité, le cervelet est connu pour soutenir l'attention (Akshoomoff et al., 1997), le langage (Murdoch, 2010), la mémoire de travail (C. J. Stoodley, 2012) et la lecture (Travis et al., 2015). Par ailleurs, le trouble phonologique de la dyslexie peut être exploré sous un angle sensorimoteur (Ramus et al., 2003; White et al., 2006). L'approche sensorimotrice pourrait être mise en lien avec la théorie de la cognition incarnée et la théorie motrice de la perception de la parole. La première considère que la cognition serait intrinsèquement liée à l'action et qu'elle prendrait sa source dans le couplage perception-action et les représentations sensorimotrices (Valera et al., 1991). La seconde stipule que la production de la parole est façonnée par la perception, et inversement (Schwartz et al., 2012).

Notre étude s'inscrit dans la continuité de ce cadre théorique en s'intéressant à la qualité des représentations sensorimotrices chez les enfants dyslexiques présentant ou non des difficultés motrices associées.

# **I. Etat des lieux sur la dyslexie développementale**

## **1) Définition de la dyslexie**

La dyslexie développementale a été définie de multiples manières depuis l'observation du premier cas en 1986 par Pringle-Morgan. D'une façon générale, la dyslexie correspond à une altération de l'identification des mots écrits. Lyon et al. (2003) proposent la définition suivante :

*« La dyslexie est un trouble spécifique de l'apprentissage qui est d'origine neurobiologique. Elle se caractérise par des difficultés à reconnaître rapidement et avec précision les mots écrits et par de faibles capacités de décodage et d'orthographe. (...) Les conséquences secondaires peuvent inclure :*

- *Des problèmes de compréhension de la lecture*
- *Une expérience réduite à la lecture entravant le développement du vocabulaire et des connaissances générales. »*

Appartenant aux troubles dits neurodéveloppementaux, elle s'inscrit dans le cadre des « troubles spécifiques des apprentissages » qui regroupent les difficultés ayant une répercussion sur la réussite scolaire. Le cadre de référence du diagnostic de la dyslexie est donné par les classifications internationales : la CIM 10 (Organisation Mondiale de la Santé, 2001) et le DSM-5 (American Psychiatric Association, 2013). Selon le DSM 5, les troubles de la lecture ne peuvent être dus à un handicap intellectuel, des troubles sensoriels non corrigés, des troubles neurologiques ou mentaux, une adversité psychosociale, un bilinguisme ou un enseignement pédagogique inadéquat.

## **2) Prévalence de la dyslexie :**

D'après l'Expertise collective de l'INSERM (2007), les données sur le nombre de cas de dyslexie varient selon la transparence du système orthographique de chaque langue et selon les définitions et critères de la dyslexie. La transparence orthographique est liée au degré de correspondance entre l'orthographe et la phonologie de la langue. Par conséquent, plus le système orthographique d'une langue est opaque et la correspondance entre les phonèmes et les graphèmes est variable, plus la prévalence de la dyslexie augmente. Par exemple, selon l'étude de Lindgren et al. (1985), la langue anglaise, qui a un système orthographique opaque, connaît une prévalence selon les définitions entre 4,5 à 12 % ou plus alors que l'italien, selon les définitions, a un taux qui varie de 3,6 % à 8,5 %.

En France, où l'opacité du système orthographique est considérée comme « intermédiaire » (Sprenger-Charolles et Colé, 2013), la prévalence varie entre 6 et 8% (Sprenger-Charolles et al., 2000; Zorman et al., 2004).

## **3) Facteurs de risque des troubles de la lecture**

### **3.1 Influence du milieu socio-culturel**

Les études mettent en avant une influence néfaste des milieux défavorisés sur le langage écrit. Par exemple, lors d'une étude sur la corrélation entre les difficultés de langage à 3 ans et demi et les retards d'apprentissage du langage écrit, Watier et al. (2006) ont montré que la proportion d'enfants présentant un retard en langage écrit au CE1 était plus élevée chez les enfants de milieux défavorisés *sans*

difficultés de langage signalées à 3 et demi que chez les enfants de milieux non défavorisés avec difficultés de langage signalées !

### 3.2 Influence du genre

L'influence du genre est souvent associée à la dyslexie. D'après l'analyse des données de 4 études de Rutter et al. (2004), les difficultés de lecture semblent se retrouver environ 1,5 à 3 fois plus chez les garçons que chez les filles.

### 3.3 Influence des troubles du langage oral

L'influence des troubles du langage oral sur le langage écrit a fait l'objet de nombreuses études. Dans une étude longitudinale, Catts et al. (2002) ont montré que 63,7% des enfants en 4<sup>ème</sup> année d'école primaire ayant eu des difficultés de langage identifiées à 5,6 ans présentent des difficultés en lecture. Les enfants n'ayant pas eu de difficultés de langage identifiées à 5,6 ans sont seulement 8,3% à présenter des problèmes en lecture.

De plus, dans une méta-analyse, Bishop et Snowling (2004) se sont intéressés aux déficits communs et distincts entre le trouble spécifique du langage oral et la dyslexie développementale. Ils proposent un modèle dans lequel le trouble spécifique du langage oral comporterait deux déficits distincts : l'altération à la fois des compétences phonologiques et des compétences linguistiques non-phonologiques (compétences sémantiques, syntaxiques, discursives...). Ainsi, la dyslexie développementale aurait des troubles phonologiques mais, en revanche, des compétences linguistiques non-phonologiques préservées.

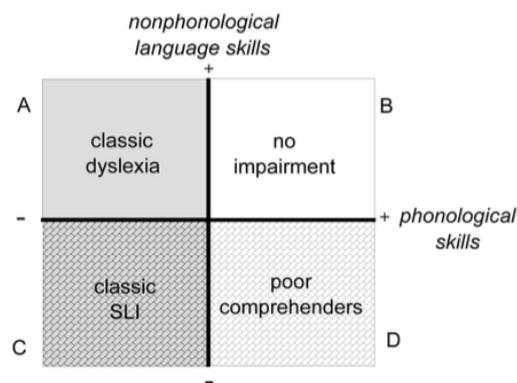


Figure 1. A two-dimensional model of the relationship between dyslexia and specific language impairment (SLI).

### 3.4 Influence génétique

Les formes familiales des cas de dyslexie ont été mises en lumière, entre autres, par Vogler et al. (1985). Si un enfant a l'un de ses deux parents qui a un trouble de la lecture, il aurait un risque 4 à 13 fois plus élevé de devenir dyslexique par rapport à un enfant dont les parents ne présentent pas ce trouble. Cependant, les études sur les agrégations ne permettent pas de confirmer l'origine génétique de la dyslexie. En effet, les familles partagent aussi un environnement commun qui pourrait influencer l'apparition de troubles de la lecture.

Les études comparant les jumeaux monozygotes (qui se sont développés à partir d'un seul œuf fécondé) et jumeaux dizygotes (provenant de deux œufs différents) ont permis de calculer l'héritabilité. En effet, les jumeaux monozygotes partagent les mêmes gènes alors que les jumeaux dizygotes ne partagent que 50% de leurs gènes (pour l'ensemble des gènes qui varient). Ainsi, il a été démontré que lorsqu'un jumeau dizygote est dyslexique, l'autre jumeau a 45% de risque d'être dyslexique. En revanche, la probabilité augmente d'environ 70% pour les jumeaux monozygotes (Plomin et al., 1994; Stromswold et al., 2001).

De plus, d'après l'Expertise collective de l'INSERM (2007), les analyses de liaisons génétiques ont mis en évidence que les troubles des apprentissages sont significativement liés à plusieurs régions chromosomiques ce qui pourrait suggérer que ces déficits, dans la majorité des cas, auraient une composante génétique complexe dans laquelle plusieurs gènes seraient impliqués. Parmi les régions chromosomiques liées, 4 gènes dont certains allèles augmenteraient le risque de dyslexie ont été proposés par différentes études (INSERM, 2007). Il s'agit des gènes suivants : DYX1C1, ROBO1, KIAA0319 et DCDC2. Cependant, les données demandent à être confirmées. En revanche, plusieurs études ont montré que les 4 gènes candidats sont impliqués dans la migration des neurones au cours du développement cérébral (Wang et al., 2006 ; Meng et al., 2005b ; Paracchini et al., 2006 et Hannula-Jouppi, 2005). Ces résultats pourraient corroborer les anomalies cérébrales observées par Galaburda et al. (1985, 2006) chez certains patients dyslexiques. Les gènes C2ORF3 et MRPL19 ont aussi été mis en avant dans le cadre de la dyslexie par Anthoni et al. (2007) mais d'après Kere (2011), la fonction de ces gènes n'étant pas encore bien établie, une poursuite de travaux scientifiques est nécessaire pour en définir le rôle exact.

En résumé, des études familiales et notamment de jumeaux ainsi que les progrès en biologie moléculaire ont permis de mettre en lumière une influence génétique dans l'apparition des troubles spécifiques de la lecture. En revanche, il est nécessaire de souligner que 1. Les cas de dyslexie ne sont pas nécessairement de cause génétique et 2. Il existe une multitude de facteurs environnementaux qui peuvent influencer l'expression génique, qui présente une grande hétérogénéité.

### 3.5 Autres influences ?

En ce qui concerne les traumatismes pré et périnataux, leur influence a été plusieurs fois mise en avant pour les difficultés scolaires. Dans une revue de la littérature sur la corrélation entre les troubles du développement et la grande prématurité, Larroque (2004) a montré, entre autres, que les problèmes d'apprentissages étaient plus fréquents chez les enfants ayant un petit poids de naissance. En revanche, pour les difficultés spécifiques à la lecture, certaines études ont mis en évidence leur rôle par le biais

du retard de langage et de ses répercussions sur le langage écrit (Silva et al., 1983 ; Stanton-Chapman et al., 2002) mais pas toutes (Esser et Schmidt, 1994).

Le rôle du bilinguisme dans les troubles des apprentissages a été évoqué dans certaines études dont celle de Emerson et al. (1997) qui a comparé la prévalence de ces troubles parmi la communauté asiatique au nord de l'Angleterre. Cependant, des études contredisent cette prévalence, notamment celle de Campbell et al. (1995) qui conclut au contraire, qu'une exposition à une seconde langue en maternelle peut améliorer la conscience phonologique.

Sprenger-Charolles et al. (2013) ont constaté que l'influence de la latéralité sur les troubles de la lecture a été beaucoup étudiée mais que plusieurs études se contredisaient. En effet, Geschwind et al. (1984) avaient trouvé, dans une étude avec un grand échantillonnage, une forte proportion d'adultes dyslexiques gauchers (il y en aurait 23 pour 1 adulte dyslexique droitier). Néanmoins, l'étude de Locke et Macaruso (1999) a mis en évidence qu'il n'y avait ni un pourcentage plus élevé de gauchers ni un pourcentage significativement plus faible de droitiers parmi les dyslexiques. Enfin, Brenneman et al. (2008) ont mis en avant l'idée qu'il faudrait considérer la latéralité sur un continuum et non par le biais d'une dichotomie droitier/gaucher. Après avoir récolté des données sur une large population entre 4 et 80 ans, ils ont suggéré que les personnes se situant dans les deux extrêmes de la latéralité présenteraient davantage de difficultés en lecture.

#### **4) Les troubles spécifiques de la dyslexie développementale**

##### **4.1 Rôle du modèle à double voie de lecture**

De nombreuses études sur la dyslexie développementale ont été basées sur des modèles de traitement de l'information écrite élaborés à partir d'observations de patients atteints de lésions cérébrales (dyslexies acquises). Ces modèles ont permis une progression de la compréhension des processus impliqués dans l'apprentissage de la lecture. Le plus utilisé est le modèle à double voie de lecture (Coltheart et al., 2001) qui avance que la lecture d'un mot isolé se fait grâce à l'activation de deux voies de traitement distinctes :

- La voie d'assemblage (ou non-lexicale) reposant sur l'utilisation de règles définissant les correspondances entre les graphèmes et phonèmes
- La voie d'adressage (ou lexicale) permettant un accès direct à un lexique mental contenant les représentations orthographiques associées aux mots

L'utilisation de ce modèle dans les études sur la dyslexie développementale avait pour objectif de déterminer si les déficits retrouvés correspondaient davantage à une atteinte de la voie d'assemblage et/ou une atteinte de la voie d'adressage.

Pour évaluer ces atteintes, l'Expertise collective de l'INSERM (2007) rappelle que les épreuves supposées tester avec le plus de précision les deux voies sont :

- Les pseudo-mots (ressemblant à des mots de la langue mais différant de quelques graphèmes comme « chatette ») pour la voie d'assemblage
- Les mots irréguliers fréquents (par exemple, le mot « sept ») pour la voie d'adressage

Ainsi, deux sous-types de dyslexie ont été mis en évidence et largement étudiés :

- La dyslexie phonologique témoignant d'une atteinte de la voie d'assemblage avec une difficulté à lire des pseudo-mots
- La dyslexie de surface correspondant à une atteinte de la voie d'adressage avec une incapacité à lire les mots irréguliers fréquents

En revanche, même si l'idée que l'on puisse identifier des sous-groupes d'enfants dyslexiques qui diffèrent par leur profil de lecture est largement soutenue, il n'y a pas de consensus sur la façon dont ces sous-types, et en particulier le profil de dyslexie de surface, doivent être pris en compte dans les modèles de lecture. Effectivement, l'emprunt d'un modèle issu de la neuropsychologie adulte dans l'étude des pathologies neurodéveloppementales comporte des limites (Sprenger-Charolles et Colé, 2013). La dyslexie développementale ne résulte pas d'une lésion cérébrale et la mise en place des procédures de la lecture suit une trajectoire développementale spécifique avec une utilisation première de la voie d'assemblage qui conditionnerait la bonne mise en place de la voie lexicale (Sprenger-Charolles et al., 1998 ; Sprenger-Charolles, Siegel et al., 2003 ; Grainger et al., 2012).

#### 4.2 Rôle des modèles connexionnistes

D'autres modèles de lecture de type connexionnistes ont été élaborés pour effectuer des simulations et mettre en lumière l'hétérogénéité des profils retrouvés dans la dyslexie développementale. Ils offrent une autre hypothèse aux modèles de lecture à double voie car ils se basent sur un processus unique de lecture et excluent la théorie d'un système de règles de correspondance grapho-phonémique et d'un système lexical distincts. Par exemple, dans le modèle de Seidenberg et McClelland (1989), les connaissances ne forment pas de structures localisées et sont distribuées par les biais d'associations spécifiques entre les unités de plusieurs couches interconnectées. Chaque couche est spécialisée dans le codage phonologique, orthographique ou sémantique. Cette approche a ainsi pu mettre en avant l'étude des cas de dyslexies mixtes chez l'enfant correspondant à une atteinte à la fois des procédures d'adressage et d'assemblage.

Le modèle connexionniste de Harm et Seidenberg (1999) inspiré des modèles de Seidenberg et McClelland (1989) et de Plaut et al. (1996) a été conceptualisé afin d'expliquer l'apprentissage de la lecture chez les dyslexies développementales. Dans les simulations d'apprentissage de la lecture, les premières informations fournies au système artificiel sont phonologiques afin de créer un réseau de traits phonologiques favorisant la capacité à catégoriser les phonèmes. Puis d'autres informations associant capacités orthographiques et phonologiques sont données au système. La technique d'apprentissage est basée sur le principe de la rétropropagation de l'erreur. Ainsi, sur la base d'exemple, le système apprend à produire une réponse phonologique à partir d'une information orthographique et par le biais d'une procédure unique. Il permet aussi de rendre compte de l'effet de fréquence en se réactualisant face à des associations grapho-phonologiques moins fréquentes mais utiles à la lecture de mots irréguliers. Enfin, ce modèle simule les possibles déficits retrouvés chez les dyslexies de surface et phonologiques en créant des lésions au système avant l'apprentissage.

Concernant les deux sous-types de dyslexie, les modèles connexionnistes permettent de rendre compte des déficits retrouvés dans la dyslexie phonologique. Les résultats ont conduit à l'hypothèse selon laquelle la dyslexie mixte s'expliquerait par une atteinte plus sévère des capacités phonologiques que dans le cas de la dyslexie phonologique « pure ». En revanche, la dyslexie de surface a été plus difficile à simuler. Les auteurs Harm et al. (1999) se sont basés sur des données rapportant que les performances de la dyslexie de surface seraient similaires à celles des normolecteurs plus jeunes sur plusieurs tâches de lecture (Manis et al., 1996 ; Sprenger-Charolles et al., 2000 ; Sprenger-Charolles et al., 2011). Ainsi, en la considérant comme un retard d'apprentissage de la lecture, ils ont essayé de la simuler en ralentissant l'acquisition (notamment en baissant le niveau d'entraînement, la qualité des informations orthographiques intégrées et en supprimant certaines unités). Cependant, le comportement typique des enfants atteints de dyslexie de surface « pure » n'a pu être retrouvé (Peterson et al., 2013). Certains chercheurs ont suggéré l'intégration d'un système sémantique qui pourraient être mis en jeu, lors de la lecture des mots irréguliers, comme on peut le retrouver atteint chez des patients présentant une démence sémantique (Woollams et al., 2007).

#### 4.3 Des sous-types de dyslexie ?

La question des sous-types de dyslexie a été étudiée par le biais de plusieurs types d'études :

- Les études de cas unique dont l'objectif est de mettre en évidence plusieurs profils d'enfants dyslexiques distincts.
- Les études de groupe dont le but est la recherche d'une norme en comparant les sujets dyslexiques avec des enfants normolecteurs.
- Les études de cas multiples qui utilisent les intérêts des deux types d'études précédents : elles prennent à la fois en compte les profils distincts de la dyslexie et portent sur une large population.

Bien que les études de cas unique ont permis la mise en lumière des dyslexies phonologiques (Temple et Marshall, 1983; Valdois et al., 2003) et des dyslexies de surface (Valdois et al., 2003), les études de cas multiples permettent de déterminer la proportion de dyslexiques phonologiques, de dyslexiques de surface et de dyslexiques qui n'entrent pas dans les deux précédents sous-types : la dyslexie mixte (Sprenger-Charolles et Colé, 2013).

Sprenger-Charolles et ses collaborateurs ont publié, en 2011, une synthèse regroupant 3 études de groupes anglaises (Castles et Coltheart, 1993; Manis et al., 1996; Keith Stanovich et al., 1997) et 3 études de groupes françaises (Genard et al., 1998; Sprenger-Charolles et al., 2000; Ziegler et al., 2008) afin d'étudier la fiabilité et la prévalence des profils de dyslexies phonologiques, de surface et mixtes en prenant en compte la variabilité de la transparence orthographique. Une forte variation de la prévalence des sous-types a été observée, qui s'expliquerait par plusieurs facteurs :

- L'utilisation de différentes méthodes dans les études pour établir le déficit. Contrairement à la méthode classique (où l'on tient compte d'un déficit absolu dans une procédure de lecture, l'autre étant préservée) les résultats retrouvés avec la méthode de régression (où l'on s'appuie sur la présence d'un déficit relatif dans l'une des procédures de lecture par rapport à l'autre) varient fortement entre les études d'une même langue et sont donc considérés comme peu fiables.

- L'utilisation de différentes mesures dans les études. Il est nécessaire d'évaluer à la fois la précision et la rapidité pour révéler une dyslexie, certains dyslexiques étant lents et précis alors que d'autres sont rapides mais peu précis. Si l'on ne tient compte que de l'un des deux critères, cela risquerait de conduire à des erreurs de diagnostic.
- L'impact de l'opacité orthographique : les études françaises évaluant la précision mettent en évidence une plus forte proportion de dyslexiques de surface qui n'est pas retrouvée dans les études anglaises qui ont utilisé la même mesure, ni dans les études françaises prenant en compte la rapidité. Même si la maîtrise des règles grapho-phonémiques est plus difficile lorsque l'orthographe est opaque, les auteurs rappellent que cela ne peut expliquer les difficultés phonologiques en lecture. En effet, la vitesse de traitement est déficitaire chez la plupart de ces enfants.

En résumé, les études de cas multiples passées en revue témoignent que, lorsque les dyslexiques sont comparés à des normolecteurs de même âge, les profils de dyslexies mixtes prédominent tandis que les profils phonologiques et les enfants présentant un simple retard d'apprentissage prévalent lorsque la comparaison se fait avec des normolecteurs de même niveau de lecture. La proportion de dyslexiques de surface est très faible (Manis et al., 1996; Sprenger-Charolles et al., 2000; Keith Stanovich et al., 1997). Par ailleurs, des difficultés phonologiques ont été remarquées au sein des dyslexiques de surface lorsqu'ils ont été comparés à des enfants du même âge (Manis et al., 1996; Sprenger-Charolles et al., 2000; Keith Stanovich et al., 1997; Valdois et al., 2003). Ces résultats concordent avec ceux de Peterson et al. (2015) qui avancent que, dans l'ensemble, les formes phonologiques et de surface de la dyslexie développementale représentent deux extrémités d'un continuum, plutôt que deux sous-types qualitativement distincts (Castles et al., 1999; Y. M. Griffiths et Snowling, 2002).

#### 4.4 Le poids des déficits phonologiques dans la dyslexie développementale

L'Expertise collective de l'INSERM (2007) indique que les difficultés sévères retrouvées chez les dyslexiques proviennent souvent d'une atteinte phonologique intervenant hors lecture comme :

- L'analyse phonémique qui est nécessaire à la mise en correspondance grapho-phonémique
- La mémoire à court terme phonologique qui est utilisée lors de l'assemblage des unités résultant du transcodage permettant l'accès aux mots. Elle est également mise en jeu pour accéder de manière précise et rapide au lexique oral.

Ainsi, ces cas de dyslexies seraient causés par un déficit cognitif spécifique de nature phonologique. On retrouve aussi un double déficit, chez la plupart des dyslexiques, avec un lexique orthographique altéré. Ce double déficit pourrait être expliqué par l'hypothèse qu'une voie d'assemblage efficace est une condition préalable à la bonne mise en place de la voie d'adressage (Sprenger-Charolles et al., 1998 ; Sprenger-Charolles, Siegel et al., 2003 ; Grainger et al., 2012). En somme, une grande majorité des enfants dyslexiques présenteraient un double déficit en lecture avec une atteinte phonologique plus sévère : elle est aussi retrouvée chez des enfants normolecteurs plus jeunes mais ayant le même niveau de lecture (NLAL). En effet, la comparaison avec des NLAL permet de distinguer le caractère déviant d'un retard développemental (Sprenger-Charolles et al., 2009). Les déficits phonologiques retrouvés chez les enfants dyslexiques sembleraient alors correspondre à une déviance développementale

contrairement aux difficultés orthographiques qui ne se retrouvent pas en comparaison avec les NLAL, s'apparentant plutôt à un retard développemental (Sprenger-Charolles et al., 2000).

#### 4.5 Explication des autres déficits retrouvés dans la dyslexie de surface

Plusieurs hypothèses ont été avancées concernant des déficits retrouvés dans certains cas de dyslexies de surface. Pour Sprenger-Charolles et al. (2013), la plupart des hypothèses partent d'une même idée : les dyslexiques de surface auraient un déficit phonologique compensé (notamment grâce à la rééducation orthophonique). De plus, au vu de l'impact des mesures sur les résultats des études, il serait envisageable que la prévalence des troubles phonologiques puisse avoir été sous-estimée lorsque la précision de la réponse a été la seule mesure prise en compte. Par ailleurs, une autre hypothèse avancée est que l'atteinte phonologique serait moins sévère chez les dyslexiques de surface que chez les dyslexiques phonologiques (Y. M. Griffiths et Snowling, 2002). Cependant, ces hypothèses ne permettent pas d'expliquer la sévérité des difficultés orthographiques retrouvées.

Stanovich et al. (1997) concluent que la dyslexie de surface serait due, dans certains cas, à une légère atteinte phonologique aggravée par un environnement défavorable. En effet, une bonne confrontation avec l'écrit étant nécessaire au développement des représentations orthographiques. Ainsi, plusieurs études ont montré que les enfants présentant des dyslexies de surface sont souvent issus de milieux peu favorisés (Jiménez et al., 2009; Keith Stanovich et al., 1997). Cependant, selon Peterson et al. (2013), les compétences orthographiques et lexicales plus faibles chez des enfants présentant une dyslexie de surface en comparaison à des normolecteurs de même niveau de lecture, seraient en contradiction avec l'hypothèse que la dyslexie de surface s'expliquerait par un simple retard de lecture.

#### 4.6 L'utilisation des stratégies compensatoires et la dyslexie développementale

Chez le normolecteur, l'acte de lire devient presque instantané au fil du temps et l'utilisation d'indices contextuels baisse en fonction de l'âge et du niveau de lecture. Contrairement aux normolecteurs habiles, les dyslexiques utilisent des stratégies contextuelles pour compenser, au moins en partie, leurs difficultés de lecture. En effet, on note un déficit moins sévère en lecture de texte qu'en lecture de mots isolés (Elbro et al., 1994; Ransby et al., 2003). Ainsi, le signe le plus révélateur d'une dyslexie serait l'impossibilité de développer des processus automatiques de reconnaissance de mots écrits isolés (Lyon et al., 2003; Stanovich, 1986) avec une persistance de cette difficulté à l'âge adulte (Elbro et al., 1994; Ransby et al., 2003).

### 5) Une abondance de comorbidités

La dyslexie est un trouble qui est rarement isolé. En effet, elle sera systématiquement retrouvée avec une dysorthographe. On la retrouve aussi fréquemment accompagnée d'un déficit de l'attention avec ou sans hyperactivité (TDAH), d'une dyspraxie, d'une dysgraphie, d'un trouble du langage oral, d'une dyscalculie ou encore d'une dyschronie. Les associations fréquentes de certains troubles posent question et la recherche de mécanismes physiopathologiques communs pourrait permettre de déterminer les facteurs déclenchants de ces différentes pathologies.

### 5.1 Les « syndromes dys »

Comme le rappelle l'Expertise collective de 2007, les troubles spécifiques des apprentissages sont souvent appelés les « syndromes dys » (dyslexie, dysorthographe, dysphasie, dyspraxie) car ils partagent un ensemble de critères communs :

- Ils surviennent en dehors d'un déficit intellectuel, perceptif ou neuropsychiatrique
- Ils entravent la bonne mise en place des apprentissages, notamment scolaires
- Ils touchent davantage les garçons que les filles pour la majorité d'entre eux
- On retrouve parfois voire souvent des antécédents familiaux concernant ces troubles
- Ils sont souvent associés entre eux chez une même personne, ce qui permet de fournir un certain degré de sévérité, entre autres, au rééducateur

Les troubles associés varient qualitativement et quantitativement selon le type de dyslexie (INSERM, 2007):

- Les dyslexies de surface ou mixtes seraient davantage associées à la dyspraxie et la dysgraphie et représenteraient souvent un tableau de trouble d'apprentissage non-verbal parfois appelé « syndrome développemental hémisphérique droit » (Rourke, 1995). Dans ce type d'association, la sévérité du trouble ne serait pas liée à l'intensité du trouble phonologique mais plutôt à l'intensité des troubles sensorimoteurs qui se manifesteraient le plus souvent par des troubles du graphisme et de la représentation spatiale (dyspraxie visuo-constructive).
- Les dyslexies de type phonologique seraient plutôt associées, entre autres, à des antécédents ou d'actuels troubles du langage oral (Castles et Coltheart, 1993; Manis et al., 1996)

### 5.2 Dyslexie et dysorthographe

Les études scientifiques s'accordent implicitement sur le fait que, dans un contexte développemental, les troubles de la lecture et les troubles de l'écriture sont intriqués et qu'ils ne peuvent apparaître de manière isolée (INSERM, 2007). En effet, même si les deux troubles ne sont pas totalement semblables, parce qu'il est généralement admis qu'écrire est plus difficile que lire (Bosman et Van Orden, 1997), les chercheurs semblent convenir de l'existence d'un lexique orthographique unique lors de la lecture et de l'écriture. Cependant, les processus d'accès et de mise en œuvre, eux, seraient différents.

### 5.3 Dyslexie et le trouble déficit de l'attention avec ou sans hyperactivité (TDAH)

La dyslexie se retrouve fréquemment associée à un TDAH. La proportion de la comorbidité de ces deux troubles varie selon plusieurs critères : le choix de leurs définitions, l'âge, le sexe de l'enfant... On retrouve un risque de 25 à 40% voire de 10 à 90% selon les études (Biederman et al., 1991; Semrud-Clikeman et al., 1992; Willcutt et Pennington, 2000).

Plusieurs hypothèses ont été émises concernant le lien entre ces deux pathologies :

- Le TDAH peut entraver les apprentissages
- L'échec scolaire peut engendrer une hyperactivité faisant partie d'un contexte syndromique TDAH ou apparaissant seulement dans un contexte environnemental (Pennington et al., 2013)
- Il existe une origine et des mécanismes pathologiques communs entre les deux troubles

Même si la recherche se tourne vers une origine commune entre les deux pathologies (Willcutt et Pennington, 2000), il est nécessaire de rappeler que les troubles de l'attention entraînent forcément des difficultés sur les apprentissages en général.

#### 5.4 Dyslexie et dyscalculie

La fréquence de comorbidité entre la dyscalculie et la dyslexie varie fortement entre les études. Une étude sur une population de 1206 enfants anglais de 9 à 10 ans a trouvé que 3,6% de ces enfants avaient des difficultés spécifiques en arithmétiques et que 64% de ces derniers étaient aussi dyslexiques (Lewis et al., 1994). A l'inverse, une étude française de 2004 réalisée dans le centre de référence de Lille ne retrouve aucune association dyslexie/dyscalculie sur 100 enfants venus consulter en neuropédiatrie pour des troubles des apprentissages scolaires (Cuvellier et al., 2004).

#### 5.5 Dyslexie et le trouble spécifique du langage (SLI)

Comme cela a été décrit dans la partie 3.3, le langage oral influence fortement le langage écrit et un trouble du langage oral augmente le risque de développer un trouble de la lecture (Catts et al., 2002). La capacité phonologique faisant défaut chez les enfants dyslexiques serait aussi altérée dans le cadre d'un trouble spécifique du langage (SLI) qui répertorie les enfants présentant des difficultés de langage sur le versant expressif et/ou réceptif. McArthur et al. (2000) ont montré que, pour une population de 110 enfants dyslexiques et de 102 enfants présentant un SLI, environ 55% des enfants dyslexiques présentaient un déficit du langage oral et 51% des enfants SLI présentaient des difficultés en lecture. En effet, l'intrication de ces deux troubles est telle que Bishop et Snowling (2004) les représentent sur un continuum où le trouble spécifique du langage oral correspondrait à une atteinte à la fois des composantes phonologiques mais aussi des autres compétences langagières (sémantiques, syntaxiques...) alors que la dyslexie se limiterait à une atteinte isolée de la composante phonologique.

#### 5.6 Dyslexie et dyspraxie

La dyspraxie est un trouble se manifestant par une difficulté à choisir, planifier et exécuter un mouvement. Elle se retrouve fréquemment associée à la dyslexie, bien que sa fréquence d'association au trouble de la lecture varie fortement selon les études. En effet, on pourrait la retrouver chez 20 %, 59 % voire 63% des enfants dyslexiques (Kaplan et al., 1998a; Ramus et al., 2003a; White et al., 2006) et chez 25% des adultes dyslexiques (Ramus, 2003b).

## 5.7 Dyslexie et dysgraphie

Dans l'étude de Habib (2003) au sein du CHU de Marseille, sur 177 enfants diagnostiqués dyslexiques, 26 enfants présentaient une dysgraphie associée. Par ailleurs, des difficultés concernant l'acte moteur de l'écriture chez les enfants dyslexiques ont été relevées dans d'autres études dont celle de Lam et al. (2011). En effet, en comparant l'écriture d'enfants chinois normolecteurs et dyslexiques, l'étude conclue que ces derniers présentaient une écriture plus lente, moins précise avec une variation plus importante de la taille des caractères.

## 5.1 Dyslexie et dyschronie

La dyschronie, trouble très peu étudié dans la littérature, est un trouble affectant la représentation des notions temporelles. Un lien possible entre la dyschronie et la dyslexie a été mis en avant par Llinás (1993) qui fait l'hypothèse que le cerveau de l'enfant dyslexique, en lien avec une altération du cervelet, n'arrive pas à donner le rythme d'activation neuronale à des systèmes de neurones. Dans une étude de Habib (2003), sur 177 enfants diagnostiqués dyslexiques, 35 enfants présentaient une dyschronie associée.

## **6) Troubles psychoaffectifs associés aux troubles d'apprentissage**

Malgré le critère « spécifique » des troubles d'apprentissage, on retrouve souvent la dyslexie accompagnée de troubles psychoaffectifs (INSERM, 2007). Ces troubles émotionnels et du comportement peuvent être externalisés comme dans le cas d'un trouble de déficit de l'attention avec ou sans hyperactivité que nous retrouvons fréquemment associé à la dyslexie. Cependant, les troubles psychoaffectifs peuvent aussi être internalisés comme dans le cas de l'anxiété et de la dépression. Ces troubles pourraient être soit secondaires aux difficultés d'apprentissage ou à un contexte environnemental défavorisant, soit directement associés aux troubles des apprentissages et présenter des mécanismes physiopathologiques communs.

Une étude longitudinale sur 1416 garçons âgés 7 à 10 ans, a montré que les enfants ayant des difficultés en lecture étaient significativement plus déprimés que les enfants sans difficultés de lecture (Barbara Maughan et al., 2003). En effet, sur les 134 garçons présentant une altération de la lecture, 23% avaient une humeur déprimée contre seulement 9,6% chez les enfants normolecteurs. Par ailleurs, ni les facteurs systématiquement corrélés à l'humeur dépressive (l'existence de punitions physiques administrées par les parents, un déficit de supervision parental voire un faible niveau socio-économique), ni les facteurs liés aux difficultés de lecture (facteurs ethniques et socio-économiques) retrouvés dans l'étude n'expliquaient la forte corrélation entre l'humeur dépressive et les troubles de la lecture. De plus, la fréquence d'association de ces deux troubles restait élevée et significative malgré l'exclusion des troubles externalisés associés (troubles des conduites, TDAH). Ainsi, l'humeur dépressive et les difficultés de lecture pourraient s'inscrire dans le contexte d'une réelle comorbidité.

## 7) Evolution

### 7.1 La persistance des difficultés de lecture

Shaywitz et al. (1999) ont suivi, de manière longitudinale, 445 enfants depuis la maternelle et ont constaté que les enfants diagnostiqués comme étant dyslexiques en grade 2 (CE1) présentaient encore un niveau de lecture inférieur aux enfants normolecteurs en grade 9 (3<sup>ème</sup>). En effet, les enfants dyslexiques présentaient une persistance des difficultés phonologiques. Par ailleurs, d'après Undheim (2009), même à l'âge adulte, les personnes dyslexiques manifesteraient encore des difficultés d'orthographe et de lecture (surtout en lecture de non-mots). Ainsi, la dyslexie est un trouble persistant qui ne se guérit pas avec le temps et les personnes adultes présentant des difficultés de langage écrit auraient tendance à éviter les situations les confrontant à leur déficit. Cela pourrait les maintenir dans un cercle vicieux de faible niveau de lecture alors même que la confrontation à l'écrit permettrait d'améliorer leur niveau (Chaix et al., 2017).

### 7.2 Conséquences scolaires, universitaires et professionnelles de la dyslexie

Il existe une stabilité des difficultés de lecture chez les dyslexiques, même à un stade d'âge adulte avancé. Une étude longitudinale de Maughan et al. (2009) a évalué 42 faibles lecteurs et 86 normolecteurs pendant l'enfance (entre 9 et 10 ans), pendant l'adolescence (entre 14 et 15 ans) et pendant l'âge adulte (entre 40 et 45 ans). Elle a mis en évidence une forte corrélation des compétences orthographiques à 14-15 ans et à 40-45 ans. Ainsi, les difficultés orthographiques présentes à l'adolescence ont persisté à l'âge adulte. L'étude a aussi remarqué que le niveau social de la famille et l'exposition à la lecture étaient des facteurs influençant le niveau d'orthographe à l'âge adulte. Enfin, l'étude s'est intéressée au devenir scolaire et professionnel des faibles lecteurs et des normolecteurs : moins de 50% des faibles lecteurs lisent pour le plaisir, deux tiers ont arrêté leur scolarité à 15 ans ou avant, et 72% ont choisi un premier travail ne présentant pas ou très peu d'exigences en lecture. Par ailleurs, une étude suédoise, réalisée sur 50 dyslexiques (entre 19 et 49 ans) étudiant pour devenir enseignants ou infirmiers, constate que la majorité de ces étudiants dyslexiques peuvent pallier leurs difficultés. Cependant, 20% d'entre eux ont besoin d'un temps d'apprentissage plus long pour arriver au même niveau d'étude que les autres étudiants normolecteurs (Olofsson et al., 2015).

## 8) Théories explicatives

### 8.1 Bases neurales de l'hypothèse dyslexique de la dyslexie chez l'enfant et chez l'adulte

Dans le cas de nombreuses langues dans le monde, les compétences phonologiques sont des pré-requis à l'apprentissage de la lecture (Castles et Coltheart, 2004). En effet, la lecture des langues alphabétiques nécessite l'utilisation des règles de conversion des graphèmes en phonèmes. Cependant, comme cela a été décrit dans la partie 4.4, des difficultés phonologiques en lecture se retrouvent dans la majorité des cas de dyslexie (Peterson et Pennington, 2012; Sprenger-Charolles et al., 2009, 2011). Ces difficultés phonologiques peuvent se manifester par une difficulté d'encodage et de restitution des unités phonologiques, d'accès au stock phonologique voire de manipulation de ces items phonologiques (Chaix et al., 2017). En somme, les enfants dyslexiques présenteraient un déficit des représentations phonologiques qui correspondrait à une atteinte de la représentation abstraite des sons de la langue. Cette altération entraînerait des difficultés en conscience phonologique et entraverait la mise en correspondance graphème-phonème (Elbro, 1998).

Ramus et al. (2003), ont observé que des adultes dyslexiques étudiant à l'université présentaient tous des troubles phonologiques (lors de tâches d'analyse phonémique, de mémoire à court terme phonologique et de dénomination rapide) en comparaison avec des normolecteurs de même âge. Ces tâches intervenant pourtant hors lecture seraient nécessaires à la mise en correspondance grapho-phonémique et à l'accès rapide et précis au lexique oral. Cependant, deux autres études sur les enfants dyslexiques retrouvent moins de sujets présentant des déficits phonologiques (Ramus et al., 2003a; White et al., 2006). Ramus et al. (2003a) retrouvent un déficit phonologique chez 77% des enfants dyslexiques alors que White et al. (2006), après une analyse des tâches phonologiques et une prise en compte du QI non verbal, constatent seulement un déficit phonologique chez 12 des 23 sujets dyslexiques. Ces études ont aussi mis en lumière que des déficits sensorimoteurs (vision, audition, motricité) ne permettaient pas d'expliquer la dyslexie mais que ces troubles pouvaient concerner un sous-groupe particulier de dyslexiques. Pourtant, il existe une association indéniable entre la dyslexie et un syndrome sensorimoteur (visuel, auditif ou moteur), ce qui est en faveur d'un facteur biologique commun sous-jacent (Ramus, 2004), même si le syndrome sensorimoteur n'explique pas directement le trouble de la lecture.

Dans la littérature, les études en neuroimagerie ont des résultats concordant avec l'hypothèse phonologique des troubles de la lecture chez les dyslexiques. En effet, en comparant des adultes et des enfants dyslexiques à des normolecteurs, certaines zones cérébrales (temporo-occipitales, temporo-pariétales et le gyrus frontal inférieur gauches) ont été caractérisées comme dysfonctionnelles chez les dyslexiques (Démonet et al., 2004; Peterson et Pennington, 2012; Richlan et al., 2011). Par ailleurs, l'étude en IRMf de Hoeft et al. (2006) a mis en évidence une hypo-activation de la région temporo-pariétale (notamment du gyrus supramarginal) de l'hémisphère gauche lors d'une tâche de jugement de rime (impliquant la conscience phonologique) chez des enfants dyslexiques. Ainsi, la région temporo-pariétale semble jouer un grand rôle dans la capacité à encoder des phonèmes (Chaix et al., 2017). De plus, la comparaison de ces sujets à des enfants de même expérience de lecture a permis de souligner le caractère déviant de leurs difficultés lors du traitement des informations phonologiques, le dysfonctionnement cérébral n'étant pas lié à un retard de maturité. Par ailleurs, Bonte et al. (2004) ont étudié les différences de potentiels évoqués entre des enfants dyslexiques et normolecteurs lors

d'une tâche de décision lexicale de mots et de pseudo-mots (en variant la régularité des phonèmes présentés). Ils ont observé des différences entre les groupes dans des fenêtres temporelles précoces (de 120 à 350 ms) qui impliqueraient le niveau phonético-phonologique et non dans des fenêtres temporelles avancées (de 400 à 600 ms) qui correspondraient au niveau lexical. Ainsi, les enfants dyslexiques auraient des difficultés spécifiques à l'étape des traitements phonético-phonologiques. Enfin, une étude en IRMf et EEG a constaté lors d'un visionnage passif d'un film (présentant des stimuli de parole) que, contrairement aux normolecteurs qui présentaient une spécialisation des hémisphères cérébraux, les adultes dyslexiques ne montraient pas de spécialisation (Lehongre et al., 2013). En effet, chez les normolecteurs, l'hémisphère droit serait impliqué dans le traitement phonologique (dominance d'ondes gamma) et l'hémisphère gauche dans le traitement du « speech envelope » comme la prosodie (dominance d'ondes delta et theta). Chez les dyslexiques, ils ont retrouvé une oscillation similaire entre les deux hémisphères cérébraux. Ainsi, ils concluent que le manque de spécialisation hémisphérique pour les oscillations gamma, qui seraient en lien avec le traitement phonologique, pourraient confirmer la présence d'un défaut de représentation et/ou d'accès aux représentations phonologiques.

Ainsi, la plupart des chercheurs s'accordent sur le fait qu'un déficit cognitif spécifique de nature phonologique serait à l'origine des difficultés de lecture retrouvées chez les personnes dyslexiques.

## 8.2 Hypothèses auditives à l'origine de la dyslexie

Comme cela a été développé dans le paragraphe précédent, une grande partie des auteurs considèrent que les difficultés de mises en correspondance entre les graphèmes et les phonèmes seraient causées par un déficit des représentations phonologiques et donc une altération des processus linguistiques de haut niveau. Cependant, certains chercheurs comme Tallal se sont demandé si le déficit phonologique pouvait être la conséquence d'une altération de la perception auditive. En effet, la perception auditive joue un rôle déterminant dans la construction de la phonologie et du langage. Une altération de celle-ci pourrait entraîner une difficulté, au moins partielle, au développement des représentations phonologiques et/ou de leur accès (Chaix et al., 2017).

En 1980, Tallal a présenté à 20 enfants dyslexiques une batterie de tests sur un support non-verbal étudiant la discrimination et la perception de l'ordre temporel. L'hypothèse était que les enfants présentant des difficultés de lecture auraient du mal à percevoir et traiter les changements rapides du signal acoustique ce qui entraverait la mise en place de leur système phonologique. En effet, comme le rappellent Chaix et al. (2017), lorsqu'une personne parle, sa fréquence varie quand elle passe d'une consonne à une autre consonne car les transformations du spectre sont très rapides. Par exemple, la différence auditive entre un /b/ et un /d/ sans aide du contexte, doit être trouvée dans une fenêtre temporelle d'environ 40 millisecondes. Les résultats de l'étude de Tallal ont montré que les enfants dyslexiques ne présentaient pas de différence avec le groupe contrôle quand les intervalles entre les stimuli présentés étaient longs mais que 8 dyslexiques sur les 20 avaient eu des difficultés lorsque les intervalles entre les stimuli présentés étaient rapides. L'étude conclue alors qu'un sous-groupe d'enfants dyslexiques pourraient présenter un défaut de perception auditive entraînant des difficultés à utiliser les compétences phonologiques lors de la lecture. Cependant, cette théorie a été remise en question, entre autres, en raison de son manque de reproductibilité, d'un effet plafond observé chez les enfants contrôles et de problèmes d'interprétation des données existantes (Chaix et al., 2017). Ainsi

les preuves pour un trouble du traitement auditif non-langagier dans la dyslexie sont très pauvres (Studdert-Kennedy, 2002).

Plus récemment, de nouvelles hypothèses ont été formulées pour tenter d'expliquer le déficit des représentations phonologiques dans la dyslexie : un déficit de la perception acoustique et/ou un déficit de la perception catégorielle. Plusieurs chercheurs se sont intéressés à la possible altération de la perception acoustique ou de l'intégration sensorielle dans la dyslexie. La « rise-time theory » selon laquelle les personnes dyslexiques présenteraient des difficultés dans des tâches nécessitant la discrimination de la durée du changement d'amplitude (même lors d'un débit lent). En effet, l'enveloppe de la parole présente de nombreuses modulations de l'amplitude qui varient en durée. Ces indices d'amplitude permettraient un bon développement rythmique et syllabique nécessaires à la mise en place des capacités phonologiques (Goswami et al., 2002; Richardson et al., 2004). De leur côté, Hämäläinen et al. (2013) ont montré en utilisant la neuroimagerie, qu'en plus d'un déficit de perception de l'amplitude de modulation, les dyslexiques manifesteraient aussi une difficulté de discrimination de la fréquence. Par ailleurs, les résultats de plusieurs études utilisant la réponse évoquée auditive spécifique (MMN ou « MisMatch Negativity ») ont mis en évidence une difficulté chez les enfants dyslexiques dans des tâches de discrimination de parole par rapport aux enfants normolecteurs (Kujala et Näätänen, 2001). Cela pourrait témoigner d'un déficit en amont de la perception consciente des voies auditives concernant spécifiquement des stimuli langagiers (Schulte-Körne et al., 1998). Cependant, les études utilisant la MMN comportent des limites méthodologiques et statistiques empêchant de généraliser les résultats trouvés (Bishop, 2007). Enfin, en 2016, Molinaro et al. ont trouvé que les dyslexiques présentaient une réduction de la synchronisation, dans les fréquences basses, entre l'oscillation des ondes cérébrales et les oscillations acoustiques pendant la perception de la parole. Les fréquences basses seraient en lien avec la prosodie de la parole. Ainsi, cette « désynchronisation » des processus de bas niveau entraverait les traitements linguistiques de haut niveau chez les personnes dyslexiques.

Une autre hypothèse explicative aux déficits phonologiques est le déficit de la perception catégorielle. Serniclaes et al. (2004) avancent que, contrairement aux normolecteurs, les dyslexiques auraient plus des difficultés à discriminer perceptivement des sons de la parole appartenant à différentes catégories de phonèmes qu'entre les sons appartenant à une même catégorie. La perception catégorielle se développe à partir de l'aptitude du nouveau-né à discriminer toutes les catégories potentielles de phonèmes dans les différentes langues du monde. Lors de la petite enfance, les capacités qui ne sont pas pertinentes pour la perception des phonèmes dans la langue maternelle se perdent. Toutefois, Serniclaes et al. concluent que les enfants dyslexiques conserveraient une plus grande sensibilité aux distinctions phonémiques non pertinentes dans leur environnement. Les enfants dyslexiques utiliseraient alors un mode allophonique de perception de la parole : ils discriminaient les sons grâce aux critères acoustiques et non linguistiques (ou catégoriels). L'étude de Serniclaes et al. (2001) a montré que le déficit catégoriel retrouvé chez les dyslexiques s'expliquerait par leur sensibilité accrue entre les sons appartenant à une même catégorie et ne se retrouverait que dans un cadre linguistique. En effet, les 19 adolescents et 17 normolecteurs devaient juger si des paires de syllabes (continuum de /ba/ et /da/) étaient différentes ou semblables dans une condition normale (sons de la parole) et dans une condition où la fréquence fondamentale des syllabes avait été retirée afin qu'elles soient entendues comme des sifflements. Les résultats ont montré que les dyslexiques étaient meilleurs que leurs pairs dans la deuxième condition qui nécessite une discrimination acoustique. Cependant, en condition normale des sons de la parole où il fallait comparer les différentes variantes de /ba/ et /da/, les

adolescents dyslexiques présentaient plus de difficultés car ils continuaient à discriminer sur des critères acoustiques (et non catégoriels) à l'intérieur d'une même catégorie. Les résultats d'une étude de Dufor et al. (2009) en neuroimagerie menée chez des adultes dyslexiques et normolecteurs concordent avec les résultats des précédentes études : plus les tâches de catégorisations des normolecteurs sont réussies, plus certaines régions cérébrales sont activées (en particulier le gyrus frontal inférieur gauche).

### 8.3 Hypothèses visuelles à l'origine de la dyslexie

Les chercheurs soutenant que la dyslexie pourrait être causée par un déficit visuel considèrent que les difficultés rencontrées dans cette pathologie ne concerneraient pas seulement le transcodage des lettres en sons. En effet, la lecture est une tâche complexe comprenant l'analyse visuelle des graphèmes, la prononciation des phonèmes et l'évocation du sens correspondant (Valdois et al., 2017). Ainsi, l'hypothèse d'un déficit visuel à l'origine de la dyslexie a été étudiée depuis longtemps (Pringle-Morgan, 1896). Certains troubles visuels ont été retrouvés associés à des troubles phonologiques (déficit du système visuel magnocellulaire et de l'attention visuelle) tandis que d'autres semblent être présents indépendamment des troubles phonologiques (encombrement visuel excessif et trouble de l'empan visuo-attentionnel).

Comme cela a été décrit dans la partie 8.2, les enfants dyslexiques semblent présenter une altération du traitement des informations temporelles rapides en modalité auditive. Des études comportementales et anatomofonctionnelles ont également retrouvé un déficit du traitement temporel de stimuli rapides en modalité visuelle (Livingstone, 1991; W. J. Lovegrove et al., 1980; Stein, 2014). Pour les auteurs de cette théorie, les dyslexiques auraient des difficultés à voir de manière précise les lettres et leur place au sein d'un mot. Cela serait dû à des troubles du système magnocellulaire qui, à l'inverse du système parvocellulaire, traite les informations visuelles de haute fréquence temporelle et de faible fréquence spatiale (Livingstone, 1991). Même si la proportion de personnes dyslexiques présentant une dysfonction du système visuel magnocellulaire varie fortement selon les études (W. Lovegrove et al., 1986; Ramus, 2003b), ce trouble n'est présent que chez ceux présentant des capacités phonologiques altérée (Borsting et al., 1996). Actuellement, la littérature scientifique ne permet pas de prouver qu'un trouble magnocellulaire spécifiquement visuel serait à l'origine de la dyslexie parce que les difficultés retrouvées s'étendent aussi à la dimension auditive (Valdois et al., 2017). Cependant, Boets et al. (2008) ont montré que les compétences magnocellulaires auditives des enfants pré-lecteurs semblent être davantage prédictives de la lecture que les compétences magnocellulaires visuelles. En effet, les premières seraient en lien avec les aptitudes phonologiques et les capacités du traitement de la parole dans le bruit qui prédisent le futur niveau de lecture. De leur côté, les aptitudes magnocellulaires visuelles seraient corrélées aux capacités de reconnaissance des lettres avant l'apprentissage de la lecture prédisant les futures compétences orthographiques.

Par ailleurs, les sujets dyslexiques présenteraient aussi une attention visuelle altérée. Effectivement, certaines études ont trouvé que le déplacement de leur attention visuelle était ralenti dans l'hémichamp visuel gauche (Facoetti et Molteni, 2001; Sireteanu et al., 2005). De son côté, l'étude de Ruffino et al. (2014) a montré, chez une population de 32 enfants dyslexiques souffrant d'un déficit phonologique, que ces enfants avaient une attention visuelle déficitaire dans sa composante spatiale mais aussi

temporelle. Enfin, une altération du déplacement spatial et temporel de l'attention a aussi été retrouvée en modalité auditive chez les sujets dyslexiques (Facoetti et al., 2010; Hari et Renvall, 2001). Ainsi, les personnes dyslexiques manifesteraient un déficit amodal (visuel, auditif) du déplacement de l'attention dans ses composantes spatiales et temporelles (Lallier et al., 2009). Ce dysfonctionnement du déplacement attentionnel semblerait se retrouver chez les dyslexiques présentant des troubles phonologiques associés, au moins dans sa dimension temporelle (Lallier et al., 2009, 2013). En revanche, le lien causal entre ce déficit et l'apprentissage de la lecture ne peut être établi en l'état actuel des données scientifiques disponibles (Valdois et al., 2017).

La co-occurrence systématique des troubles d'origine visuelle précédemment décrits et des troubles phonologiques posent question. Certains auteurs comme Franck Ramus (2004) émettent l'hypothèse que les troubles visuels seraient secondaires aux troubles phonologiques alors que d'autres chercheurs avancent, à l'inverse, que les troubles phonologiques seraient la conséquence des troubles visuels (Vidyaagar et Pammer, 2010).

Certains chercheurs ont trouvé que des personnes dyslexiques présentaient un encombrement visuel excessif (Bouma et Legein, 1977; Spinelli et al., 2002). L'encombrement visuel (« crowding ») se manifeste par une identification plus difficile d'un stimulus visuel lorsque celui-ci est présenté au milieu d'autres stimuli en comparaison au contexte où il est présenté de manière isolée (Bouma, 1970). Cet effet pourrait jouer un rôle dans la lecture car elle peut nécessiter à la fois l'identification d'une lettre au sein d'un mot, mais aussi d'un mot au sein d'une phrase. Martelli et al. (2009) ont conclu que 60% des enfants dyslexiques de leur étude présentaient une lenteur de lecture qui pouvait être expliquée par un encombrement visuel anormal. Effectivement, plus on augmentait la distance entre les lettres présentées, plus le niveau d'encombrement visuel diminuait et plus la vitesse des enfants dyslexiques et normolecteurs s'améliorait. En revanche, un espacement idéal n'a pas permis aux sujets dyslexiques de compenser leur déficit de vitesse de lecture car ils demeuraient plus lents que leurs pairs. De plus, sur un mot de 3 lettres, il a été observé que les enfants dyslexiques, comme les normolecteurs, reconnaissaient plus difficilement la deuxième lettre par rapport aux premières et dernières lettres. Les personnes dyslexiques sembleraient souffrir d'une difficulté plus importante d'identification de la seconde lettre (Valdois et al., 2017).

D'autre part, l'hypothèse d'un trouble de l'empan visuo-attentionnel a été émise pour tenter d'expliquer les difficultés rencontrées par certaines personnes dyslexiques ayant du mal à traiter la séquence orthographique d'un mot en dépit d'une capacité phonologique préservée (Bosse et al., 2007). L'empan visuo-attentionnel qui permettrait de traiter simultanément des stimuli visuels distincts serait important dans l'activité de lecture. En effet, même si au début de l'apprentissage de la lecture les enfants décodent chaque lettre une à une (« c-h-a-t »), ils commencent rapidement à traiter simultanément des séquences de lettres (« cha » « eau ») puis des mots (« château »). Ainsi, Lobier et al. (2013) ont montré que, chez des normolecteurs, la vitesse de lecture serait conditionnée par leurs compétences d'empan visuo-attentionnel qui elles-mêmes seraient liées à leurs ressources attentionnelles. Certaines études comme celle de Bosse et al. (2007) ont mis en évidence une réduction de l'empan visuo-attentionnel chez les sujets dyslexiques. Toutefois, l'utilisation d'un support avec des lettres dans les études ne permettait pas de savoir si seul le déficit de l'empan visuo-attentionnel était impliqué. C'est pourquoi d'autres études sur des chiffres, des formes de géométries quelconques, des pseudo-lettres, des caractères japonais ont été faites et ont montré, chez les sujets dyslexiques, une difficulté du traitement simultané des stimuli visuels indépendamment de l'utilisation ou non de séquences de lettres (M. Lobier et al., 2012; Valdois et al., 2012). Enfin, des études en neuroimagerie

ont mis en évidence, lors d'une réduction de l'empan visuo-attentionnel, une sous-activation des lobules pariétaux supérieurs qui ne sont pas impliqués dans les capacités phonologiques (Lobier et al., 2014; Peyrin et al., 2011). Il existerait donc des troubles de l'empan visuo-attentionnel et de l'attention visuelle sans troubles phonologiques associés (Valdois et al., 2017).

#### 8.4 Les théories du trouble du traitement temporel global

Comme cela a été développé dans la partie 8.3, les personnes dyslexiques manifesteraient un déficit amodal (visuel, auditif) du déplacement de l'attention dans sa composante temporelle (Lallier et al., 2009). L'étude de Hairston et al. (2005) émet l'hypothèse que les dyslexiques présenteraient une fenêtre temporelle anormalement longue, pendant laquelle l'intégration de stimuli visuels et auditifs s'effectue. Cela perturberait leur capacité à intégrer des stimuli de différentes modalités (comme cela pourrait être le cas lors de la conversion grapho-phonémique). Ainsi, certains auteurs se sont questionnés sur un éventuel déficit temporel global chez le sujet dyslexique. Par exemple, l'étude de Renvall et al. (2005) étudiant la modalité tactilo-kinesthésique, en utilisant des potentiels évoqués somesthésiques, seraient en faveur d'un déficit temporel de nature « pansensorielle » de la dyslexie. De plus, certaines études en neuroimagerie, dont celle de Jantzen et al. (2005), seraient en faveur d'un traitement temporel sous-tendu par un vaste réseau distribué (comprenant des structures corticales, sous-corticales et cérébelleuses) qui serait dépendant du contexte et qui trouverait son origine dans les processus sensorimoteurs primaires. Dans leur revue scientifique, Rubia et Smith, (2004) ont également conclu que les mêmes régions cérébrales seraient impliquées dans le « motor timing » (comprenant l'organisation temporelle des actes moteurs, de la parole et des actes cognitifs) et la perception du temps (correspondant à la gestion cognitive du temps). Ainsi, des activités telles que la reproduction d'un rythme, la perception et l'estimation d'une durée partageraient des réseaux neuronaux communs qui pourraient être déficitaires chez les sujets dyslexiques (INSERM, 2007). En outre, l'effet Mc-Gurk (McGurk et MacDonald, 1976) qui évalue l'intégration de stimuli multisensoriels est intéressant à étudier dans le cadre de la dyslexie. Il est retrouvé chez le sujet normal et correspond, par exemple, à la perception de la syllabe /ta/ lorsque le sujet entend le locuteur prononcer /pa/ mais qu'il le voit visuellement articuler /ka/. Cet effet ne se retrouve pas chez le sujet dyslexique qui a tendance à se concentrer sur le son prononcé visuellement par le locuteur (Hayes et al., 2003). Par ailleurs, certains travaux en imagerie fonctionnelle ont mis en avant le rôle de l'aire de Broca et d'une zone temporale inférieure proche de l'aire de reconnaissance visuelle des mots dans l'effet McGurk (Jones et Callan, 2003).

#### 8.5 De la théorie cérébelleuse à la théorie procédurale

La théorie cérébelleuse est partie du constat que les dyslexiques présentaient, en plus des difficultés de lecture, des symptômes pouvant se retrouver lors d'une dysfonction du cervelet : retard de développement moteur, troubles de l'équilibre et de la coordination motrice, difficultés de nature séquentielle et temporelle, altération de la vitesse de traitement de l'information et trouble de l'automatisation (R.I. Nicolson et Fawcett, 1990; Roderick I. Nicolson et Fawcett, 1999, 2007; C. J. Stoodley et al., 2005). Selon les auteurs de cette théorie, le cervelet pourrait jouer un rôle primordial dans la manifestation de l'ensemble de ces symptômes (Nicolson, 2011; Nicolson et al., 2001). En

effet, le cervelet est connu pour être très impliqué dans la motricité mais on le retrouve aussi engagé dans l'attention (Akshoomoff et al., 1997), le langage (Murdoch, 2010), la mémoire de travail (C. J. Stoodley, 2012) et la lecture (Travis et al., 2015).

Un dysfonctionnement du cervelet pourrait gêner la lecture dans plusieurs aspects. Tout d'abord, son implication dans le contrôle des mouvements oculaires, dans l'attention spatiale et dans la vision périphérique pourrait affecter la dimension motrice de la lecture (Stein et Walsh, 1997). Par ailleurs, son incidence sur la motricité serait susceptible d'altérer légèrement la mise en place précoce des capacités articulatoires. Ceci entraînerait un déficit de la boucle auditivo-articulatoire altérant, à son tour, la mémoire phonologique à court terme et la conscience phonologique (Nicolson et al., 2001). Par exemple, Griffiths et Frith (2002) ont montré que les adultes dyslexiques présentaient des difficultés de conscience articulatoire. De plus, son rôle dans le repérage spatio-temporel pourrait aussi expliquer les problèmes de coordination sensorimotrice et d'intégration multisensorielle retrouvés chez les dyslexiques (INSERM, 2007). Enfin, son intervention ainsi que celle des boucles cortico-striato-thalamiques, dans la mémoire procédurale, pourrait expliquer les difficultés d'automatisation retrouvées chez les personnes dyslexiques. Effectivement, un certain degré d'automatisation est nécessaire pour réussir à lire (Ruthruff et al., 2008). L'identification des mots doit s'obtenir de manière automatique afin que le lecteur puisse diriger son attention vers des processus de plus haut niveau impliqués dans la compréhension (Schadler et Thissen, 1981). Par ailleurs, un déficit de l'automatisation pourrait aussi expliquer les difficultés d'acquisition de règles de grammaire, de morphosyntaxe ou de phonologie (Krishnan et al., 2016) retrouvées chez les sujets dyslexiques.

Après avoir observé des déficits d'automatisation chez les sujets dyslexiques, certains chercheurs se sont intéressés au déficit de la mémoire procédurale et de l'apprentissage procédural dans la dyslexie. En effet, cette mémoire procédurale, correspondant au stockage implicite de nos savoir-faire (faire du vélo, conduire ou encore connaître ses tables de multiplication...), sous-tendrait l'automatisation de certaines capacités cognitives (grammaire, morphosyntaxe, phonologie). En partant de cette hypothèse, la méta-analyse de Lum et al. (2013) conclut que les personnes dyslexiques présenteraient un déficit de l'apprentissage procédural et de la mémoire procédurale. L'apprentissage procédural chez le dyslexique semble être plus lent et les difficultés retrouvées tendent à se normaliser après plusieurs sessions d'entraînement. De plus, ce déficit procédural n'a pas été retrouvé chez les enfants non dyslexiques mais présentant des difficultés de lecture (Stoodley et al., 2008).

Les auteurs de la théorie cérébelleuse, Nicolson et Fawcett (2007) ont alors élargi leur réflexion sur l'apprentissage procédural et la mémoire procédurale à l'ensemble des troubles des apprentissages. En effet, ils proposent de différencier les troubles généralisés des apprentissages (déficiences intellectuelles) et les troubles spécifiques des apprentissages par le biais de deux modes d'apprentissages distincts. Une altération de l'apprentissage déclaratif serait à l'origine des déficiences intellectuelles alors que ce serait un trouble de l'apprentissage procédural qui expliquerait les troubles spécifiques des apprentissages. Ainsi, cette hypothèse considère que l'altération des boucles neuroanatomiques (cortico-striatales et cortico-cérébelleuses), en lien avec le déficit d'automatisation, expliquerait l'ensemble des manifestations retrouvées dans les troubles neurodéveloppementaux (troubles moteurs, langagiers, spatio-temporels...) et leur fréquence de comorbidité. Effectivement, plusieurs études mettent en avant un déficit de l'apprentissage procédural pas seulement dans la dyslexie (Lum et al., 2013) mais aussi dans les troubles spécifiques du langage oral (Lum et al., 2014), dans les troubles du déficit de l'attention avec ou sans hyperactivité (Barnes et al., 2010) et dans les

dyspraxies (Gheysen et al., 2011). Les études en neuroimagerie retrouvent aussi un fonctionnement atypique du cervelet (Stoodley, 2016) et des ganglions de la base (Krishnan et al., 2016) chez les sujets présentant des troubles neurodéveloppementaux. L'implication du cervelet dans la fonction de régulation émotionnelle pourrait aussi expliquer la fréquence de troubles émotionnels et anxieux associés aux troubles des apprentissages (Schutter et van Honk, 2009). Enfin, Biotteau et al. (2015, 2016) ont testé la théorie de Nicolson et Fawcett chez des enfants présentant une dyslexie isolée, des enfants présentant une dyspraxie isolée et des enfants présentant une dyslexie et une dyspraxie associées. Ils ont remarqué que les trois groupes d'enfants étaient capables d'automatiser une tâche motrice. Des fonctionnements atypiques des réseaux cérébelleux et striataux ont bien été relevés, mais ils n'étaient pas localisés de façon aussi dichotomique que ceux avancés dans la théorie de Nicolson et Fawcett.

Cependant, la théorie cérébelleuse a été très critiquée pour plusieurs raisons. La première est que tous les dyslexiques ne présentent pas des troubles moteurs : ils ne sont retrouvés que chez environ 50% d'entre eux. De plus, la majorité des expériences rapportées dans la littérature ne concernent que des tâches motrices. Une mauvaise performance n'est donc pas nécessairement attribuable à une déficience cérébelleuse (White et al., 2006). Par ailleurs, plusieurs chercheurs n'ont pas retrouvé le lien causal entre les performances dites cérébelleuses et la lecture ou le déficit phonologique (Ramus, 2003b; Ramus et al., 2003a; Stoodley et al., 2005; White et al., 2006). Ainsi, la seule chose qu'il est possible d'affirmer est qu'un sous-groupe de personnes dyslexiques présentent des troubles moteurs et que certains pourraient manifester des troubles cérébelleux (INSERM, 2007).

## 8.6 En résumé

De nombreuses théories ont tenté d'expliquer les causes de la dyslexie. En effet, la dyslexie est un trouble complexe qui présente des symptômes variés (phonologiques, auditifs, visuels, moteurs, spatiaux, temporels...) et qui se retrouve fréquemment associé à d'autres troubles (TDAH, TDC, SLI...). Ces particularités rendent la distinction entre les causes explicatives et les simples comorbidités difficile. Cependant, la littérature scientifique s'accorde sur le fait que la majorité des sujets dyslexiques présentent un trouble phonologique qui entrave à la fois la mise en place de la correspondance grapho-phonémique et celle de la voie d'adressage. C'est pour cela que la recherche tend à remplacer la dichotomie entre la « dyslexie de surface » et la « dyslexie phonologique » par un continuum. En revanche, certains dyslexiques semblent présenter des troubles de nature visuelle en dehors de toute atteinte phonologique.

Enfin, en l'état actuel des connaissances, même si la théorie du déficit de traitement temporel et la théorie cérébelleuse ne peuvent expliquer la dyslexie, elles apportent des pistes de réflexion autour de la comorbidité des troubles neurodéveloppementaux. Ces théories prennent en compte la dimension temporelle, la dynamique d'apprentissage et les déficits à la fois aux niveaux sensorimoteurs et cognitifs (INSERM, 2007). Le théorie procédurale de Nicolson et Fawcett (2007) est particulièrement intéressante pour tenter d'expliquer la forte association des troubles comorbides, l'hétérogénéité de leurs symptômes tout en gardant la présence d'un trouble isolé possible (Chaix et al., 2017). Enfin, dans l'apparition de difficultés en lecture, les nombreux facteurs environnementaux (environnement linguistique, régularité du système orthographique...) ne peuvent être oubliés au profit des facteurs cérébraux et cognitifs (INSERM, 2007).

## **II. Les représentations sensorimotrices**

Les représentations sensorimotrices correspondent aux représentations cérébrales que nous nous faisons dans notre cerveau de notre propre corps engagé dans des actions. C'est grâce à ces représentations que nous pouvons percevoir, comprendre et agir dans notre environnement. Ces représentations internes de notre corps en action sont composées de notre schéma corporel ainsi que d'un répertoire des différentes stratégies motrices et des interactions avec notre environnement.

### **1) Schéma corporel et représentations internes**

Le schéma corporel correspond aux représentations internes des segments de notre corps en mouvement (Dijkerman et De Haan, 2007). Il concerne aussi le contrôle postural, c'est-à-dire la capacité de maintenir l'équilibre du corps en dépit de l'effet déstabilisateur des mouvements. Nous le sollicitons pour l'exécution d'actions, mais il joue également un rôle important dans l'imitation, l'apprentissage et la compréhension des actions que nous observons (Rizzolatti et Craighero, 2004). Il contribue à l'élaboration de la conscience de notre corps et de son interaction avec l'environnement.

#### **1.1 Rôle de l'intégration multisensorielle**

Ajuriaguerra définit le schéma corporel comme ceci : « Édifié sur les impressions tactiles, kinesthésiques, labyrinthiques et visuelles, le schéma corporel réalise dans une construction active constamment remaniée des données actuelles et du passé, la synthèse dynamique, qui fournit à nos actes, comme à nos perceptions, le cadre spatial de référence où ils prennent leur signification » (Ajuriaguerra, 1974). Ainsi, la construction du schéma corporel est un processus continu, qui commence dès le début de la vie. Pendant l'enfance, au fur et à mesure que le corps se développe, les représentations du corps et des actions, stockées sous forme d'informations au niveau cérébral, vont évoluer pour s'adapter aux changements morphologiques et hormonaux liés à la croissance.

Même arrivé à maturation, notre schéma corporel est constamment réactualisé sur la base d'informations multisensorielles captées par le corps lors de son interaction avec l'environnement. Cette multitude d'informations sensorielles fusionne en un percept unique et permet l'élaboration de représentations internes, également appelées représentations sensorimotrices (Haggard et Wolpert, 2005). Par exemple, les informations visuelles et proprioceptives de la position de notre main ont chacune des caractéristiques propres et des biais, mais la combinaison de ces diverses informations aboutit à une seule et même représentation de la localisation et de la position de ce membre, grâce au processus d'intégration multisensorielle (Maravita et al., 2003).

La modalité sensorielle la plus prégnante dans l'encodage des informations spatiales et la construction du schéma corporel est la proprioception. Elle joue un rôle majeur dans la signalisation de la posture et l'exécution des mouvements (J.-P. Roll et al., 1991). Elle est responsable de l'élaboration d'un cadre de référence stable et égocentré dans lequel notre corps peut percevoir et agir aisément, anticiper les conséquences sensorielles résultant de ces actions, et adapter sa motricité (Paillard, 1982). Des fuseaux neuromusculaires sont présents dans les muscles, les tendons et les articulations, et transmettent au cerveau des informations sur la position et les mouvements des segments du corps dans l'espace (J. P.

Roll, 2005). Ainsi, la proprioception joue un rôle important dans le retour d'informations sur les erreurs produites et la représentation sensorimotrice du mouvement permettant d'adapter au mieux la commande motrice. Grâce à ces représentations sensorimotrices, nous sommes en mesure de nous représenter comment les différents segments de notre corps sont localisés dans l'espace avant et pendant l'exécution d'une action et construisent notre schéma corporel (Head et Holmes, 1911).

## 1.2 La théorie des modèles internes

Les modèles internes sont définis comme un ensemble de connaissances implicites des caractéristiques physiques du corps (cinématiques musculaires), du monde extérieur, et de leurs interactions (Wolpert et Ghahramani, 2000). Le système nerveux central (SNC) réalise et intègre une modélisation de l'interaction entre les différentes informations des systèmes sensoriels, moteurs et environnementaux. Ces mécanismes neuronaux permettent de simuler des comportements, contrôler une action et en prédire les conséquences. Il existe 2 types de modèles internes : le modèle interne inverse (de l'anglais, « inverse model ») et le modèle interne prédictif (de l'anglais « forward model ») (Lebon et al., 2013) :

### 1.2.1 *Le modèle interne inverse*

Toute action naît d'une intentionnalité préalable, correspondant au projet ou désir de réalisation d'une action dans un but précis (Jeannerod, 2009). C'est à partir de cette intention d'action que la commande nerveuse se basera pour la programmation de l'action. La théorie des modèles internes stipule que les mouvements désirés sont reliés à la commande motrice appropriée : il s'agit du modèle inverse. Le terme « inverse » indique que la relation causale attendue est inversée : les entrées (commandes neuronales) sont calculées à partir des sorties (mouvements réalisés, conséquences sensorielles recherchées par le sujet). En effet, c'est l'objectif recherché (sortie) qui motive la programmation de la commande motrice (entrée).

La production des commandes motrices appropriées se fait en 2 étapes de transformation. La première est une transformation cinématique, dans laquelle la trajectoire à réaliser est planifiée sous forme de coordonnées vectorielles informant sur la direction et l'étendue du mouvement. Puis la 2<sup>ème</sup> étape, appelée transformation cinétique, permet la conversion de ces informations vectorielles en forces musculaires pour permettre l'exécution du mouvement souhaité. Cette dernière transformation doit prendre en compte les propriétés biomécaniques du corps (Krakauer et al., 1999).

### 1.2.2 *Le modèle interne prédictif*

Le modèle interne prédictif intervient juste à la suite du modèle interne inverse, c'est-à-dire pendant l'exécution de l'action. Il se base sur la commande motrice ainsi que sur l'état de l'environnement extérieur et du système biomécanique pour établir une prédiction des conséquences sensorielles de l'action (Miall et Wolpert, 1996). Il produit une simulation interne de la dynamique du mouvement réalisé simultanément à l'exécution de l'action. Ainsi, cette simulation permet au SNC d'anticiper les conséquences sensorielles et de les comparer à celles ressenties par le sujet en temps réel. Cette

estimation anticipée des états sensoriels permet d'adapter en temps réel la posture et de diminuer les délais de réajustement en cas d'erreur de traitement.

Les modèles internes prédictifs ont été explorés grâce à des études s'intéressant à la force de préhension et à la trajectoire de la main lors de la manipulation manuelle d'objets (Flanagan et Wing, 1990). Grâce aux modèles internes prédictifs, le SNC est capable d'anticiper la force nécessaire à mettre en œuvre en fonction du poids de la charge à soulever. Des études réalisées auprès de patients souffrant du syndrome du canal carpien ont montré que cette habilité est préservée même en l'absence ou diminution de l'acuité tactile (Thonnard et al., 1999). Cela témoigne de la robustesse de ces modèles internes.

### *1.2.3 Les ajustements posturaux anticipés (APA)*

La théorie des modèles internes fournit un cadre théorique cohérent permettant la compréhension des comportements moteurs. Les ajustements posturaux anticipés (APA) préviennent les perturbations rencontrées, lors de la réalisation des mouvements volontaires, afin d'adapter la posture. Ils sont une bonne illustration de la mise en jeu des prédictions issues des modèles internes prédictifs. Le paradigme de délestage bimanuel est une manière efficace d'illustrer et d'explorer les APA. Au cours de cette expérience, le sujet porte un poids fixé sur son avant-bras gauche à l'aide d'un dispositif équipé d'un électro-aimant. Lorsque le poids est délesté à l'insu du sujet, on mesure une amplitude maximum de flexion du coude liée au réflexe de délestage. En revanche, lorsque le sujet saisit lui-même le poids avec sa main droite, l'avant-bras gauche est bien stabilisé, ce qui est révélateur d'un contrôle postural anticipé efficace (Cignetti et al., 2018). La déstabilisation posturale est nettement moindre lorsque c'est le sujet lui-même qui soulève la charge, que quand c'est une tierce personne qui le fait. En effet, le sujet peut anticiper quelques millièmes de secondes avant le délestage en inhibant les muscles fléchisseurs du bras (Massion et al., 1999).

## 1.3 Développement du schéma corporel et des représentations sensorimotrices

Le schéma corporel, considéré comme « primitif » à la naissance se développe tout au long de l'ontogenèse, avec la multiplication des expériences sensorielles et l'acquisition de nouvelles habiletés motrices. Le couplage perception-action précoce, fonctionnel dès la naissance va servir de socle à l'élaboration des représentations sensorimotrices au cours de l'ontogénèse (Assaiante et al., 2014; Assaiante, 2020). Dès les premiers instants de vie, le bébé va découvrir petit à petit son propre corps, intégrer les frontières qui séparent son corps de l'environnement extérieur, comprendre que ses membres lui appartiennent... A partir de 7 ans, le schéma corporel, construit sur la base de l'intégration proprioceptive est relativement solide. Cela a été mis en évidence par des études en imagerie fonctionnelle par résonance magnétique (IRMf) utilisant un paradigme de vibrations tendineuses. Ce paradigme consiste en l'induction d'un mouvement illusoire créé par une vibration au niveau des tibias, et a permis d'établir que les bases neurales de l'intégration proprioceptive étaient similaires à celles des adultes à partir de 7 ans, s'agissant de l'activation des réseaux sensorimoteurs (Fontan, 2017). Cependant, les représentations internes arriveront pleinement à maturation bien plus tard. Des études ont exploré la capacité d'anticipation d'une perturbation posturale au cours d'une action volontaire. Pour ce faire, elles ont utilisé le paradigme de délestage bimanuel évoqué plus haut.

Cet ajustement postural est déjà présent à l'âge de 3 ans ½ mais va s'améliorer au fur et à mesure que le sujet grandit et que les représentations internes s'affinent (Grasso et al., 1998). Une transition aux alentours de 6-7 ans a été mise en évidence indiquant une maturation des représentations qui permet alors la mise en place d'un meilleur contrôle anticipé (Schmitz et Assaiante, 2002). Cette meilleure capacité d'anticipation motrice ouvre la porte à une plus grande capacité d'apprentissage. Elle continue de se développer lentement jusqu'à 16 ans, âge à partir duquel on observe des compétences de stabilisations posturales équivalentes à celles des adultes (Barlaam et al., 2012).

Ces différences dans l'utilisation des modèles internes entre les enfants et les adultes suggèrent une longue maturation cérébrale qui continue au cours de l'adolescence permettant un affinement des modèles internes. Aux alentours de 10-12 ans, on observe, grâce aux techniques d'imagerie cérébrale, une diminution de la matière grise au profit d'une augmentation de la matière blanche dans les régions frontales, pariétales et striales (régions cérébrales particulièrement impliquées dans le traitement proprioceptif) (Lebel et al., 2008). L'augmentation de la matière blanche serait le reflet d'une myélinisation axonale, tandis que la diminution de la matière grise correspondrait à un élagage synaptique (Blakemore, 2012). Cette élimination des synapses entraîne des modifications au niveau de la connectivité fonctionnelle, qui assure la communication entre différentes structures cérébrales. En effet, on passe d'une connectivité fonctionnelle (FC) diffuse à une FC plus focalisée et ainsi une topologie plus restreinte dans une tâche d'intégration proprioceptive en IRMf (Cignetti et al., 2016). L'adolescence apparaît alors comme une période clé de restructuration cérébrale qui permet de passer de réseaux surconnectés et non spécifiques chez l'enfant, à des réseaux plus focalisés et spécifiques chez l'adulte.

#### 1.4 Substrats neuronaux impliqués dans les modèles internes

Les modèles internes représentent un système complexe faisant appel à des structures cérébrales diverses, telles que le cervelet, le cortex pariétal, le cortex frontal, les aires motrices primaires et supplémentaires et le cortex somatosensoriel (Jeannerod, 1994; Nowak et al., 2007; Sirigu et al., 1996) qui ont pu être mises en lumière grâce à des techniques d'imageries cérébrales.

La planification et le contrôle de l'action impliquent l'activation des aires pariétales postérieures et prémotrices (Jeannerod, 1994). L'intégration des propriétés physiques des objets et le traitement des informations somatosensorielles relatives à celles-ci (informations proprioceptives, visuelles, tactiles), permettant une adaptation posturale et de la force de préhension, seraient gérés par la voie dorsale partant du cortex strié jusqu'au cortex somatosensoriel et au lobe pariétal postérieur (Goodale et Milner, 1992). Des études ont permis de révéler le rôle important joué par le cervelet dans le calcul de l'erreur sensorimotrice et l'envoi du signal d'erreur au SNC au cours de la réalisation d'une tâche. Plus précisément, ce serait les cellules de Purkinje, concentrées dans le cortex cérébelleux, qui émettraient une décharge particulière permettant l'envoi du signal lorsque les conséquences sensorielles ne sont pas celles qui étaient prévues par le SNC (Ramnani, 2006). Chez des patients atteints de lésions cérébelleuses, on peut observer une altération de la prise en compte du signal d'erreur entraînant des difficultés d'adaptations motrices d'un essai à l'autre. Les lésions cérébelleuses entraînent alors une perturbation des adaptations motrices prédictives (Morton et Bastian, 2006; Smith et Shadmehr, 2005).

## 1.5 Cas de pathologies entraînant des déficits de représentations sensorimotrices

Certaines pathologies neurologiques peuvent affecter les afférences proprioceptives, et ainsi perturber l'encodage des informations spatiales et le contrôle postural. Ainsi la localisation d'une cible chez des sujets atteints de désafférentation proprioceptive est perturbée si les informations visuelles (cadre référentiel allocentré) ne sont pas assez structurées pour permettre une compensation de la déficience proprioceptive (cadre référentiel égocentré) (Blouin et al., 1993).

En ce qui concerne les troubles développementaux, une altération de l'utilisation des représentations sensorimotrices a été avancée pour expliquer le trouble développemental de la coordination (TDC), également appelé « dyspraxie » (Wilson et al., 2017). Le TDC est un trouble retrouvé chez 6% des enfants âgés de 5 à 11 ans (American Psychiatric Association, 2013). C'est un trouble dans lequel on retrouve fréquemment des comorbidités, et particulièrement avec le TDAH et la dyslexie (Kaplan et al., 1998b). Il est caractérisé par un ralentissement importante du traitement des informations (Bernardi et al., 2016) et des déficits sensorimoteurs. Globalement, ces déficits concernent la coordination sensorimotrice, l'équilibre, les orientations visuo-spatiales et visuo-constructives, ainsi que les motricités fines et globales (Geuze, 2008; Vaivre-Douret, 2008). Différentes études cliniques ont tenté d'établir une classification de ces troubles mais aucun consensus n'a été établi (Vaivre-Douret, 2014). Cependant, il semble tout de même exister, parmi les enfants atteints de TDC, un sous-groupe présentant une altération de la perception visuo-spatiale. Ce déficit perceptif pourrait alors expliquer les déficits moteurs observés chez ces sujets (Chaix et Albaret, 2013).

Des études ont mis en évidence un accroissement du déficit de la planification de l'action proportionnel à la complexité de la tâche (Adams et al., 2016). Une altération des APA chez des enfants TDC a été démontrée avec des tâches de soulèvement de charge. Cette mauvaise anticipation participerait au déficit de contrôle postural chez ces enfants (Jover et al., 2010). Des études plus récentes du même groupe, ont précisé chez les enfants dyspraxiques sans comorbidité, que le déficit sensorimoteur se situerait au niveau de la réactualisation des représentations en temps réel plutôt qu'au niveau de la construction des représentations sensorimotrices (Cignetti et al., 2018). Cependant, des études supplémentaires doivent encore être menées sur ce sujet. L'Expertise collective réalisée par l'INSERM, ayant pour but de réaliser un bilan des connaissances scientifiques sur le thème du TDC, recommande d'approfondir les recherches autour de l'apprentissage sensorimoteur, des modèles internes et de l'intégration proprioceptive chez les sujets TDC (INSERM, 2019).

### 2) Imagerie motrice :

L'imagerie mentale réfère à la génération d'un traitement interne d'une situation, sur la base des informations multisensorielles et des modèles internes intériorisés. Elle peut être générée sur la base de différents canaux sensoriels. L'imagerie motrice est un type d'imagerie mentale. Elle correspond à la simulation mentale de la réalisation d'une action, sans exécution ni mise en jeu des muscles associés. Elle est mise en jeu dans diverses situations de la vie quotidienne, comme quand l'on se prépare mentalement à effectuer un mouvement, que l'on souhaite se remémorer les étapes précises d'une action que l'on est en train d'apprendre à faire (comme la conduite par exemple), ou même lorsque l'on regarde quelqu'un effectuer une action que l'on souhaite imiter par la suite (Williams et al., 1995).

## 2.1 Simulation mentale d'une action

Chaque action exécutée est couplée à une simulation interne de cette réalisation, tandis que chaque action simulée mentalement n'implique aucune exécution d'action. Ainsi, selon la théorie de la simulation (Jeannerod, 2001), la simulation d'une action équivaut à une action et met en jeu des mécanismes neuronaux similaires. De plus, la composante temporelle de l'exécution est conservée lors de la simulation (Decety et al., 1989). Le temps de l'action imaginée est supposé être fidèle au temps nécessaire pour réaliser l'action. Ce phénomène est appelé isochronie. Cette simulation mentale peut être effectuée spontanément lorsque l'on demande à un sujet d'estimer la faisabilité ou non d'une action (par exemple, attraper un objet placé à une certaine distance). Inconsciemment, le sujet doit réaliser mentalement le mouvement pour effectuer cette estimation, et le temps nécessaire pour y parvenir est très proche du temps dont il aurait eu besoin pour réellement attraper l'objet (Jeannerod, 2001). Aujourd'hui, le principe de l'isochronie est utilisé dans la recherche pour explorer les capacités d'imagerie motrice et apprécier la qualité des représentations sensorimotrices. Pour cela, il est possible d'utiliser un paradigme de chronométrie mentale, au cours duquel le sujet doit se chronométrer en train d'effectuer une action, puis se chronométrer en simulant mentalement la même action. Ces études ont permis d'attester la présence de représentations sensorimotrices déjà robustes pendant l'enfance (7-10 ans), bien qu'elles continuent progressivement de s'améliorer au cours de l'adolescence, pour atteindre une pleine maturité à la fin de l'adolescence (Choudhury et al., 2007; Skoura et al., 2009).

## 2.2 Couplage perception-action

La théorie du couplage perception-action met en évidence un lien fonctionnel entre les représentations sensorielles mises en jeu lors de l'observation d'une action, et les représentations motrices mises en jeu lors de la programmation et l'exécution d'une action (Assaiante, 2014). La compréhension et l'identification des mouvements humains présents dans notre champ perceptif sollicitent les représentations sensorimotrices. Des études ont démontré une meilleure identification des mouvements lorsqu'il s'agit de mouvements déjà maîtrisés par le sujet observant (Casile et Giese, 2006) ou lorsqu'il s'agit de mouvements possibles à réaliser, par comparaison avec des mouvements impossibles (Jacobs et al., 2004). Dans l'étude de Casile et Giese (2006), les sujets ont dû apprendre un nouveau schéma moteur les yeux bandés (absence de feedback visuel). La reconnaissance visuelle de ces schémas moteurs a été évaluée avant et après l'apprentissage. Une amélioration de la performance de reconnaissance a été observée à la suite de l'entraînement. La reconnaissance visuelle serait donc hautement corrélée au répertoire moteur, et implique une connaissance procédurale de l'action. Ainsi il existe un dialogue permanent entre notre corps agissant et notre corps percevant, équivalant à un couplage entre la perception et l'action. L'observation d'une action apparaît alors comme une grande opportunité d'apprentissage puisque la cognition se créerait à partir des informations perçues.

Ce couplage perception-action est sous-tendu par le système des neurones miroirs qui constitue alors un élément clé des représentations sensorimotrices (Rizzolatti et Craighero, 2004). Les neurones miroirs ont été découverts à l'occasion d'expériences réalisées sur des singes, au cours desquelles certains neurones prémoteurs, appelés par la suite « neurones miroirs », s'activaient aussi bien lors de la réalisation d'une action, que lors de l'observation de cette même action (Di Pellegrino et al., 1992).

Il a également été démontré que la modalité auditive entrait en jeu dans cette activation neuronale, puisque les neurones miroirs peuvent également s'activer par le son produit par une action (Kohler et al., 2002). De manière générale, ce réseau neuronal joue un rôle important dans la compréhension des actions et de leurs intentions. En effet, ils permettent au sujet observant de répondre à deux questions : « qu'est-ce que la personne est en train de faire ? » et « pourquoi elle le fait ? » (Iacoboni et al., 2005). Cette implication dans la compréhension s'étend également au sujet de l'empathie émotionnelle, en permettant de comprendre et ressentir les émotions d'autrui (Wicker et al., 2003). Enfin, à la lumière de ce qui a été décrit, ces neurones pourraient également participer à la compréhension du langage en liant émetteur et récepteur du message (Rizzolatti et Arbib, 1998).

### 2.3 Substrats neuronaux communs à l'exécution et la stimulation de l'action

La théorie de la simulation atteste que même si chaque action conserve en partie son propre réseau spécifique, il existe un chevauchement de certains réseaux neuronaux entre l'exécution et la simulation d'une action (Jeannerod, 2001).

#### 2.3.1 *Implication du cortex moteur primaire*

L'activation du cortex moteur primaire, se situant dans la partie postérieure du lobe frontal, a été mise en évidence par des études en imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) aussi bien lors de l'exécution que lors de la simulation mentale d'un même mouvement (Roth et al., 1996). La stimulation magnétique transcrânienne (TMS) a même permis d'aller plus loin, en démontrant l'influence de cette activation corticale sur le motoneurone (correspondant à une cellule nerveuse reliée à un muscle et commandant sa contraction). En effet, lors de la simulation mentale de la flexion de l'index, on peut observer une augmentation de l'activation des potentiels évoqués moteurs dans le muscle fléchisseur (Vargas et al., 2004).

#### 2.3.2 *Implication du striatum*

Les ganglions de la base, également appelés noyaux gris centraux, correspondent à un groupe de plusieurs structures sous-corticales. Ils ont un rôle dans le contrôle de la motricité. Une de leurs structures, le striatum, s'active lors de l'exécution et l'imagination d'une action. Cependant, le striatum étant lui-même composé de 2 sous-parties : le putamen et le noyau caudé, chacune de ces sous-parties concerne une modalité. Au cours de l'exécution d'un mouvement réel, c'est le putamen qui s'active, tandis que lors de la simulation d'une action, il s'agit du noyau caudé (Gerardin et al., 2000). Ces modalités engagent différentes zones appartenant à deux boucles fonctionnelles cortico-sous-corticales distinctes : l'une correspondant à une boucle sensorimotrice (putamen), et l'autre une boucle plus cognitive (noyau caudé).

### 2.3.3 *Implication du cervelet*

Cette structure cérébrale joue un rôle important dans la coordination des mouvements et l'apprentissage moteur (Glickstein et Yeo, 1990). Son implication pendant des tâches d'imagination d'action a été démontrée par des enregistrements de tomographie par émission monophotonique (TEMP) et de positon (PET-SCAN) (Grafton et al., 1996; Ryding et al., 1993). Il s'agit de deux différentes techniques d'imageries permettant d'obtenir une reconstitution tridimensionnelle du débit sanguin cérébral (rCBF). L'étude de Ryding et al. (1993) a mesuré l'activation cérébelleuse lors d'une tâche de comptage silencieux (activité verbale et cognitive avec suppression de la sortie motrice verbale), et d'une tâche d'imagerie motrice consistant à s'imaginer taper une balle de tennis contre un mur avec une raquette, tout en restant silencieux et immobile. L'activation cérébelleuse a été observée dans les deux cas, mais de manière beaucoup plus prononcée dans la tâche d'imagerie motrice. En effet, cette dernière tâche faisait appel à la coordination spatio-temporelle, habilité étant gérée par le cervelet.

L'observation et l'imagination activeraient chacune une partie différente de la portion postérieure du cervelet, tandis que la réalisation d'un mouvement activerait plutôt la partie antérieure (Grafton et al., 1996).

### 2.3.4 *Implication du cortex prémoteur et de l'aire motrice supplémentaire (SMA)*

Ces 2 zones cérébrales se situent sur le cortex frontal, en avant du cortex moteur primaire, et constituent l'aire 6 de Brodmann. Elles participent à la planification des tâches complexes et à la coordination des mouvements. L'activation du cortex prémoteur et de l'aire motrice supplémentaire (SMA) gauche lors de l'exécution, de l'imagination et de l'observation de mouvements a été mise en évidence par PET-SCAN à l'occasion de différentes études (Decety et al., 1997; Grafton et al., 1996). L'activation de la SMA lors de l'imagination est localisée dans une zone plus antérieure que celle ayant lieu au cours de l'observation (Grafton et al., 1996). L'activation dans le cortex prémoteur se situe dans l'hémisphère gauche pour les tâches d'imagination, et dans le droit pour celles d'observation (Grafton et al., 1996).

### 2.3.5 *Implication des cortex pariétal postérieur et préfrontal*

Ces deux cortex constituent les aires corticales associatives. Celles-ci sont très connectées et participent à l'interprétation des informations sensorielles. Le cortex pariétal postérieur joue un rôle important dans la génération des représentations sensorimotrices (Sirigu et al., 1996). De son côté, le cortex préfrontal est impliqué dans la préparation d'une action motrice volontaire (Frith et al., 1991). Decety et al. (1994), Gerardin et al. (2000), Grafton et al. (1996) ont également pu observer une activation de ces zones cérébrales aussi bien pendant l'exécution que l'imagination de l'action.

### 3) Les liens entre la motricité et le langage

Les théories de la cognition incarnée, du couplage perception-action et les découvertes datant de la fin du XXème siècle sur les neurones miroirs, permettent d'établir un lien de réciprocité entre la perception et la production du langage.

#### 3.1 Les neurones miroirs dans la perception de la parole

La participation des neurones miroirs dans la compréhension du langage a fait l'objet de certaines études. Elles ont permis d'établir que le codage phonémique effectué au cours de l'écoute de parole et de la production de la parole faisait appel à la participation de certaines zones cérébrales sensorimotrices communes situées notamment sur la voie dorsale (Grabski et Sato, 2020). Les neurones miroirs joueraient alors un rôle dans la perception de la parole.

#### 3.2 La théorie de la perception de la parole pour le contrôle de l'action

Ce couplage pourrait ainsi intervenir dans la compréhension et l'élaboration du langage. Ce concept a été défini dans la « théorie de la perception de parole pour le contrôle de l'action » (PACT, de l'anglais « perception for action control theory ») (Schwartz et al., 2012). Cette théorie stipule que la production de la parole est façonnée par la perception, et inversement. En effet la perception a joué un grand rôle dans l'élaboration des gestes articulatoires grâce aux indices visuels et auditifs propres à chaque son (par exemple, la paire /m/-/n/ est proche auditivement mais peut se distinguer plus facilement visuellement). De son côté, la perception de la parole implique la récupération des représentations internes des gestes articulatoires. Ainsi, les unités de parole sont caractérisées par une cohérence à la fois motrice et perceptive.

#### 3.3 Rôle facilitateur de la pré-activation de la modalité sensorielle dans le traitement de l'information linguistique

D'autres études s'inscrivant dans le cadre théorique de la cognition incarnée et du couplage perception-action ont mis en évidence que l'activation préalable de la modalité perceptive dans laquelle est présenté un stimulus linguistique (auditif ou visuel) apparaît comme un facteur facilitateur de traitement sémantique de l'information (Scerrati et al., 2015). Cela s'explique par le fait que le traitement sémantique est la conséquence d'une simulation perceptive consistant en l'activation des informations sensorielles d'entrée et que ce traitement sémantique peut être aidé par une activation préalable de la même modalité sensorielle. Autrement dit, le traitement sémantique d'une phrase lue (modalité visuelle) sera facilité si une autre phrase a été présentée visuellement précédemment.

## **PROBLEMATIQUE**

Comme nous l'avons vu précédemment, le trouble phonologique de la dyslexie pourrait s'expliquer par une altération plus globale, et non spécifique au langage. En effet, l'abondance de comorbidités associées à la dyslexie serait en faveur d'un mécanisme physiopathologique sous-jacent commun. Si l'on prend l'exemple de la dyspraxie, on pourrait la retrouver chez 20% à 60% des enfants dyslexiques (Kaplan et al., 1998; Ramus et al., 2003a; White et al., 2006). Effectivement, dès le début du développement, la sensorialité entretient des liens étroits avec la motricité, et ce couplage perception-action participe à l'élaboration de la cognition. Des études se sont intéressées à la sensorimotricité des enfants dyslexiques en observant leurs capacités visuelles, auditives et motrices (Ramus et al., 2003a; White et al., 2006). Cependant, les représentations sensorimotrices n'ont été explorées, à l'aide d'un protocole écologique, que très récemment chez les adultes (Marchetti et al., soumis). Ainsi, notre étude a pour but d'explorer les représentations sensorimotrices chez les enfants dyslexiques en posant plusieurs questions : Est-ce que l'atteinte des représentations phonologiques chez l'enfant dyslexique est associée à une atteinte plus générale des représentations sensorimotrices ? Ou est-ce que l'atteinte des représentations sensorimotrices est à placer comme une comorbidité associée à des troubles sensorimoteurs ?

## **METHODE**

Notre recherche s'inscrit dans un protocole expérimental ayant pour objectif d'explorer la qualité des représentations sensorimotrices chez les enfants dyslexiques présentant ou non des difficultés motrices associées.

### **1) Population**

Dans le cadre de cette étude et dans le contexte sanitaire lié à la pandémie de COVID 19, nous avons fait passer un questionnaire-« anamnèse », un paradigme de chronométrie mentale, la batterie MABC-2 et un questionnaire de ressentis à 6 enfants dyslexiques, suivis en orthophonie, âgés de 8 ans à 11 ans 11 mois. En raison du faible effectif de sujets, nous avons ajouté les données de 4 autres enfants, précédemment acquises par l'équipe de Christine Assaiante, avec le paradigme de chronométrie mentale et le questionnaire de ressentis. Ces résultats enfants ont été comparés à 52 adultes dyslexiques (31 femmes, âge : 22 ans  $\pm$  2, 3 ans) et 58 adultes normolecteurs (36 femmes, âge : 22 ans  $\pm$  2 ans) qui constituent le travail de thèse de Rebecca Marchetti. Au final, le paradigme de chronométrie mentale a pu être analysé chez une population de 20 sujets enfants et 110 sujets adultes, répartis en 4 groupes. Un groupe d'enfants présentant des troubles des apprentissages (DYS enfants) constitué de 10 enfants atteints de dyslexie (6 filles, âge : moyenne 9 ans et 4 mois) et un groupe contrôle (CONT enfants) constitué de 10 enfants sans trouble des apprentissages (6 filles, âge : moyenne 9 ans et 4 mois). Un groupe de 52 adultes dyslexiques de 18 à 29 ans (DYS adultes) et de 58 jeunes adultes sans trouble des apprentissages (CONT adultes).

Les enfants et adultes dyslexiques ont été appariés en genre, âge et niveau scolaire aux participants contrôles. L'échantillon comportait plusieurs critères d'exclusion :

- Les enfants présentant une déficience intellectuelle
- Les enfants ayant une déficience sensorielle non corrigée

## 2) Matériel

Notre protocole expérimental est constitué d'un premier questionnaire-« anamnèse », d'un protocole expérimental de chronométrie mentale accompagné d'un questionnaire sur les ressentis du sujet et du test normalisé MABC-2.

### 2.1 Paradigme de chronométrie mentale

Ce paradigme a pour but d'évaluer la qualité des représentations internes de l'action. Il s'appuie sur l'imagerie motrice. Pour cela, il a été demandé aux sujets d'exécuter des actions et de s'imaginer en train de réaliser ces mêmes actions. Si les durées d'actions exécutées et imaginées sont égales (ce que l'on appelle isochronie), cela témoigne d'une bonne qualité des représentations sensorimotrices. Le sujet devait se chronométrer lui-même à l'aide d'un chronomètre. Chaque exécution d'action était suivie d'une simulation d'action, et cette alternance a été répétée 5 fois pour chaque tâche. Les tâches proposées sont issues de la thèse de Rebecca Marchetti, actuellement en cours, explorant la qualité des représentations internes chez des adultes dyslexiques.

Les activités proposées impliquent :

- Une utilisation du corps dans sa totalité
- Une utilisation de certaines parties du corps (main, appareil articulatoire...)

La chronométrie est une approche non invasive qui permet d'étudier simultanément le cerveau et le comportement d'une personne. Le meilleur outil pour mesurer l'activité cérébrale et le comportement apparent du patient est le temps lui-même (Jensen, 2006).

Les actions ont été choisies dans le répertoire des actions de la vie quotidienne d'un enfant. Huit actions différentes ont été proposées :

- Marche naturelle : marcher sur une ligne de 3 mètres de longueur
- Marche en tandem : marche sur une ligne de 4,5 mètres en collant bien les orteils aux talons
- Assis-debout : se lever d'une chaise
- Ecriture d'une phrase au stylo
- Répétition d'une phrase
- Lecture à voix haute de phrases
- Lecture silencieuse de phrases

Les enfants devaient réaliser ces actions à leur vitesse naturelle. Les phrases répétées et écrites étaient les mêmes pour les 5 essais (1 essai = une alternance exécution/simulation). Pour la répétition, il s'agissait de répéter "On a toujours besoin d'un plus petit que soi.". Pour l'écriture, il était demandé d'écrire "Il fait très beau en été.". Enfin les tâches de lecture de phrases à voix haute et silencieuses étaient différentes pour chaque essai, mais chaque phrase attribuée à la tâche de lecture à voix haute possédait une phrase "équivalente" en tâche de lecture silencieuse avec des mots similaires mais agencés dans un ordre différent. Voici des exemples de phrases pour la tâche de lecture à voix haute : "Le chat miaule, il hérissé les poils de son dos et grimpe alors tout en haut du meuble.", "le poussin donne des coups de bec pour faire un trou et sortir de son œuf". Voici des exemples de phrases pour

la tâche de lecture silencieuse : “Le chat grimpe tout en haut du meuble alors qu’il hérissé les poils de son dos.”, “pour faire un trou et sortir de l’œuf, le poussin donne des coups de bec”.

Dans chaque tâche nous avons mesuré en secondes la durée de l’action réalisée (DR) et la durée de l’action imaginée (DI). Afin de comparer les performances d’imagerie motrice entre nos deux groupes de sujets, nous avons calculé pour chaque tâche un indice d’imagerie motrice (IM) de la façon suivante :  $IM = \text{abs}(Dr-Di)/Dr$ . Plus cet indice est supérieur à 0, plus la différence entre les durées du mouvement imaginé et réalisé est importante, autrement dit, moins bonnes sont les représentations internes de l’action.

A l’issue des épreuves du paradigme de chronométrie mentale, nous avons fait passer aux enfants un questionnaire de ressentis sur la réalisation de l’imagerie motrice pour chacune des tâches. Ils ont dû situer leur niveau de difficulté sur une échelle de 7 points allant de -3 (très difficile) à 3 (très facile). Ce questionnaire comprenait également quelques questions visant à expliciter l’utilisation qu’ils ont, ou pas, de l’imagerie motrice au quotidien.

## 2.2 MABC-2

Révision du M-ABC, le MABC-2 (Henderson et al., 2007) est un test standardisé évaluant les compétences motrices chez des enfants et adolescents de 3 à 16 ans 11 mois. Il est très utilisé en recherche et a récemment été étalonné sur une population française (Marquet-Doléac et al., 2016). Il permet d’évaluer les performances mettant en jeu la coordination motrice lors d’activités quotidiennes.

Les épreuves spécifiques au groupe de 7 à 10 ans ont été utilisées dans le cadre de notre étude :

- Placer des chevilles, enfiler un lacet, suivre un trajet pour évaluer la dextérité manuelle
- Attraper à deux mains une balle de tennis (avec rebond pour les 7-8 ans et sans rebond pour les 9-10 ans), lancer un sac lesté sur un tapis cible pour explorer la capacité à viser et attraper
- Tenir en équilibre sur une planche, marcher talon-pointe en avant et sauter à cloche-pied sur des tapis afin d’observer l’équilibre statique et dynamique

Lors de la passation du test, un exemple et un entraînement ont été proposés à l’enfant afin de s’assurer de sa bonne compréhension de l’exercice.

Le MABC-2 fournit des données quantitatives et objectives : une note standard est attribuée à chacun des trois domaines (dextérité manuelle, capacité à viser et attraper et équilibre statique et dynamique) ainsi qu’une note totale de test traduisant la performance motrice globale de l’enfant. Des seuils critiques précisent si la note totale obtenue indique la présence d’un trouble moteur (résultat inférieur à  $-2$  écart-type), des capacités motrices « à risque » (résultat inférieur à  $-1$  ET) et/ou des performances dans la norme (résultat supérieur à  $-1$  ET). Enfin, des données qualitatives recueillies au cours de l’examen viennent enrichir l’analyse globale des sujets.

### **3) Protocole expérimental**

Les 6 sujets dyslexiques, suivis en orthophonie, ont été recrutés par le biais de leur orthophoniste, de l'école et du bouche-à-oreille de parents sur la ville de Marseille. Les expérimentations se sont déroulées, dans le respect des mesures sanitaires en vigueur, au domicile des sujets entre les mois d'Octobre 2020 et Janvier 2021. Au préalable, un consentement a été signé et un questionnaire-« anamnèse » a été rempli par les parents des sujets. Par ailleurs, afin de limiter la fatigabilité des enfants, les passations dont la durée totale est comprise entre 1h40 et 2h, ont été proposées sur deux jours distincts dans un ordre aléatoire. Ainsi, les enfants ont passé la batterie MABC-2 lors d'une rencontre et le paradigme de chronométrie mentale ainsi que le questionnaire sur les ressentis lors d'une autre rencontre.

Les 4 enfants dyslexiques et 10 enfants normolecteurs, dont nous avons ajouté les données suite au faible recrutement lié au contexte sanitaire, avaient passé le même protocole de chronométrie mentale durant l'année 2019-2020, directement dans leur établissement scolaire. Les 110 sujets adultes dyslexiques ou normolecteurs, comme nos 6 sujets, avaient également réalisé au laboratoire (LNC) la batterie du MABC-2 et le même protocole de chronométrie mentale.

### **4) Analyse statistique**

Différentes analyses statistiques ont été réalisées sur les résultats du paradigme de chronométrie mentale. Dans un premier temps, nous avons comparé la durée de chaque action entre les groupes. Pour ce faire nous avons utilisé une ANOVA à deux facteurs groupe x tâche. Puis, pour chaque groupe et afin de tester l'isochronie entre les durées des actions réalisées et imaginées, nous avons comparé les  $D_r$  aux  $D_i$  en utilisant une ANOVA pairée à deux facteurs (condition x tâche). Enfin, afin de comparer directement les performances entre chaque groupe de sujets, nous avons comparé les IM des sujets DYS à ceux des sujets CONT en utilisant une ANOVA à trois facteurs âge x groupe x tâche. Dans chacune de ces analyses, les analyses pour comparaisons multiples ont été faites en utilisant des tests de Sidak. Le seuil de significativité est de  $p < 0,005$ . Les indicateurs de tendances choisis sont les moyennes et les écarts types.

## RESULTATS

### 1) Paradigme de chronométrie mentale

#### 1.1 Les enfants avec des troubles des apprentissages ralentissent-ils leurs temps d'exécution ?

La figure 1 représente les moyennes et écarts types des durées des différentes actions lorsque celles-ci sont réellement exécutées dans le groupe des enfants et adultes, contrôles et dyslexiques. L'analyse statistique révèle un effet significatif de la tâche ( $F(2.687, 317) = 503.4, p < 0,0001$ ), un effet de l'âge « enfants vs adultes » ( $F(1, 118) = 137.6, p < 0,0001$ ), et un effet du groupe « contrôle vs DYS » ( $F(1, 118) = 4.458, p = 0,037$ ). En revanche, les analyses de comparaisons multiples révèlent que l'effet de la dyslexie n'est présent que dans le groupe des adultes, et non pas chez les enfants.

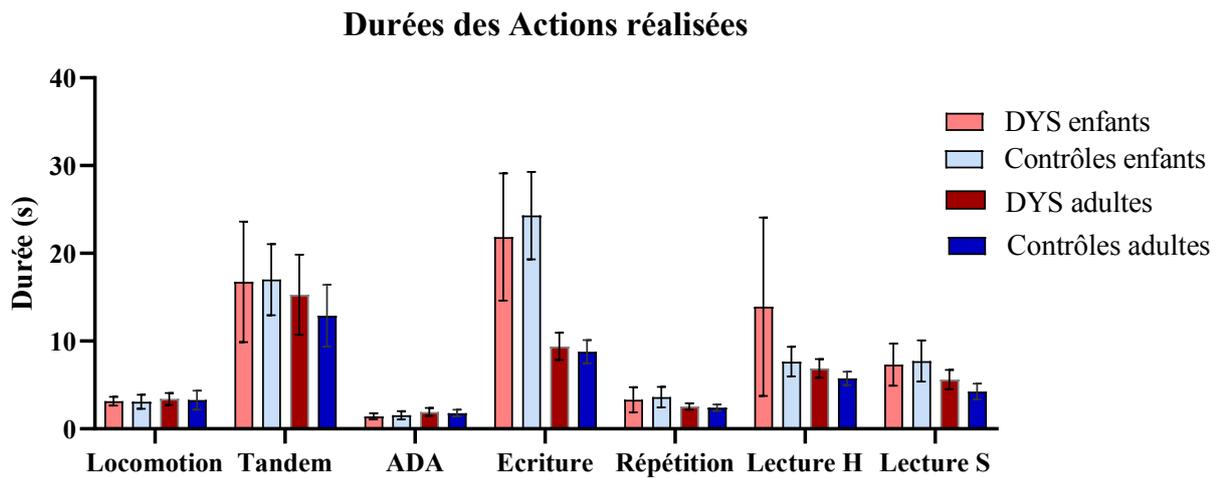


Figure 1 : moyennes et écarts types des durées (en seconde) des actions réalisées dans les groupes des enfants dys (en rose), enfants contrôles (en bleu clair), adultes dyslexiques (en rouge), adultes contrôles (en bleu foncé). Tâches isolées.

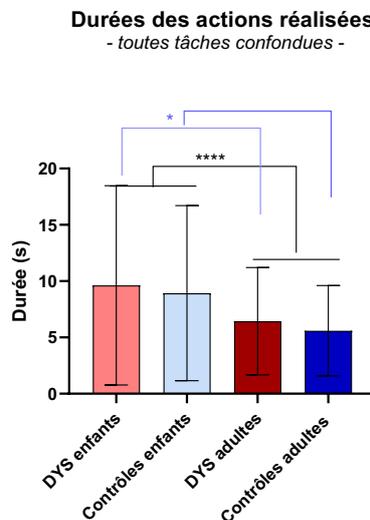


Figure 2 : moyennes et écarts types des durées (en seconde) des actions réalisées dans les groupes des enfants dys (en rose), enfants contrôles (en bleu clair), adultes dyslexiques (en rouge), adultes contrôles (en bleu foncé). Tâches groupées.

## 1.2 Les enfants avec des troubles des apprentissages présentent-ils plus de variabilité dans leurs temps d'exécution ?

La figure 3 représente les moyennes et écarts types des coefficients de variations des différentes actions lorsque celles-ci sont réellement exécutées dans le groupe des enfants et adultes, contrôles et dyslexiques. L'analyse statistique révèle un effet significatif de la tâche ( $F(5.181, 611.4) = 51.28, p < 0,0001$ ), un effet de l'âge « enfants vs adultes » ( $F(1, 118) = 76.34, p < 0,0001$ ), et un effet du groupe « contrôle vs DYS » ( $F(1, 118) = 4.972, p = 0,027$ ).

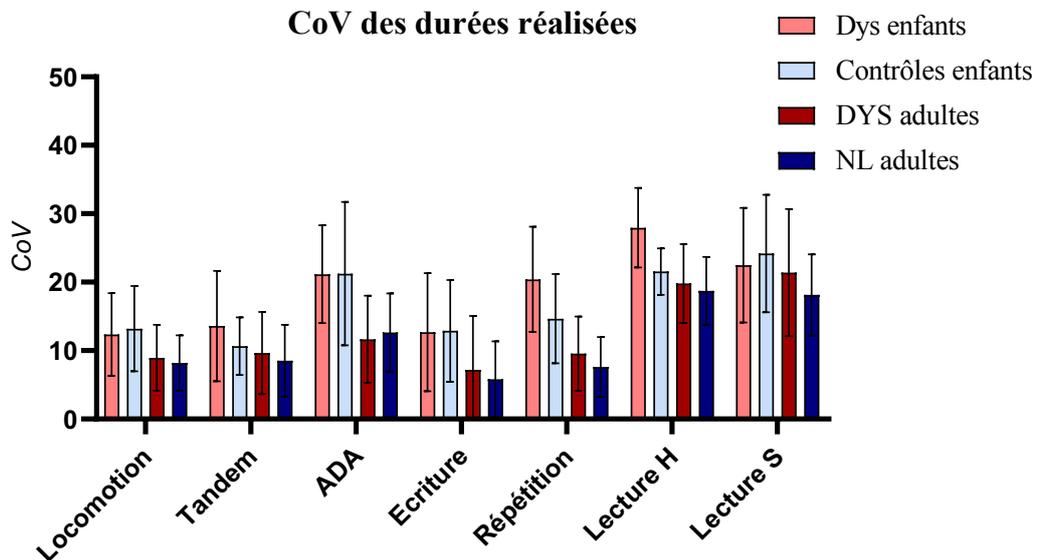


Figure 3 : moyennes et écarts types des coefficients de variations des actions réalisées dans les groupes des enfants dys (en rose), enfants contrôles (en bleu clair), adultes dyslexiques (en rouge), adultes contrôles (en bleu foncé). Tâches isolées.

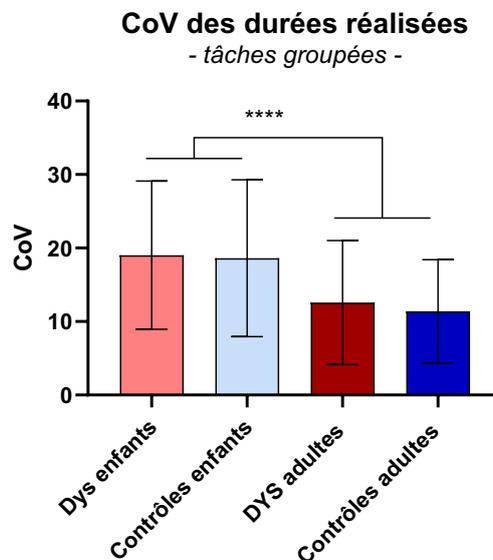


Figure 4 : moyennes et écarts types des coefficients de variations des actions réalisées dans les groupes des enfants dys (en rose), enfants contrôles (en bleu clair), adultes dyslexiques (en rouge), adultes contrôles (en bleu foncé). Tâches groupées.

### 1.3 Absence ou présence d'isochronie dans nos groupes

#### 1.3.1 Enfants contrôles

La figure 5 représente les moyennes et écarts types des durées de différentes actions lorsque celles-ci sont réellement exécutées et imaginées dans le groupe des enfants contrôles. L'analyse statistique révèle un effet global de la tâche ( $F(2.894, 170.7) = 337.1, p < 0,0001$ ), de la condition « réalisée vs imaginée » ( $F(1.000, 59.00) = 183.4, p < 0,0001$ ) et de l'âge « enfants vs adultes » ( $F(1, 59) = 50.87, p < 0,0001$ ).

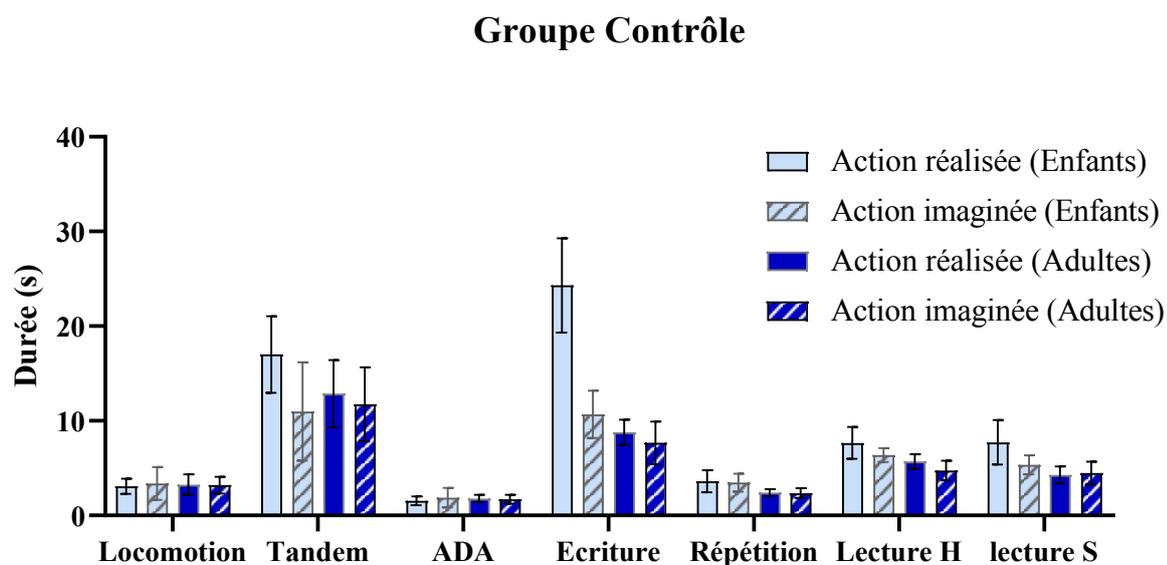


Figure 5 : moyennes et écarts types des durées (en seconde) des actions réalisées (non hachuré) et imaginées (hachuré) dans le groupe des contrôles (enfants : en bleu clair ; adultes : en bleu foncé). Avec \*\*\* :  $p < 0,001$

#### 1.3.2 Enfants avec troubles DYS

La figure 6 représente les moyennes et écarts types des durées des différentes actions lorsque celles-ci sont réellement exécutées et imaginées dans le groupe des enfants présentant des troubles DYS. Comme pour le groupe contrôle, l'analyse statistique révèle un effet global de la tâche ( $F(2.078, 120.5) = 169.2, p < 0,0001$ ), de la condition « réalisée vs imaginée » ( $F(1,000, 58,00) = 84.04, p < 0,0001$ ) et de l'âge « enfants vs adultes » ( $F(1, 58) = 11.16, p = 0,0015$ ).

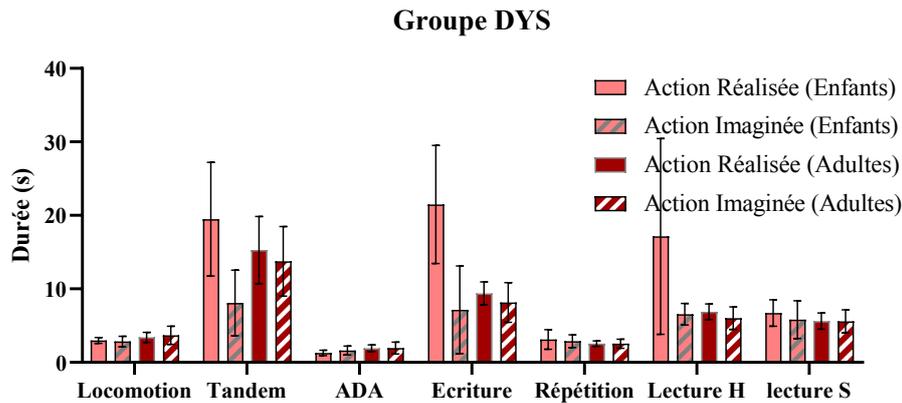


Figure 6 : moyennes et écarts types des durées (en seconde) des actions réalisées (non hachuré) et imaginées (hachuré) dans le groupe des dys (enfants : en rose ; adultes : en rouge). Avec \*\*\* :  $p < 0,001$

#### 1.4 Indice d'Imagerie Motrice (IM) : Comparaison des deux groupes

La figure 7 représente les moyennes et écarts types des IM dans les deux groupes de sujets pour toutes les tâches de l'étude. L'analyse statistique révèle un effet global de la tâche ( $F(3.459,432,4)=20,48$ ,  $p < 0,0001$ ), un effet de l'âge « enfants vs adultes » ( $F(1, 125) = 54,02$ ,  $p < 0,0001$ ), mais pas d'effet du groupe « contrôle vs DYS ».

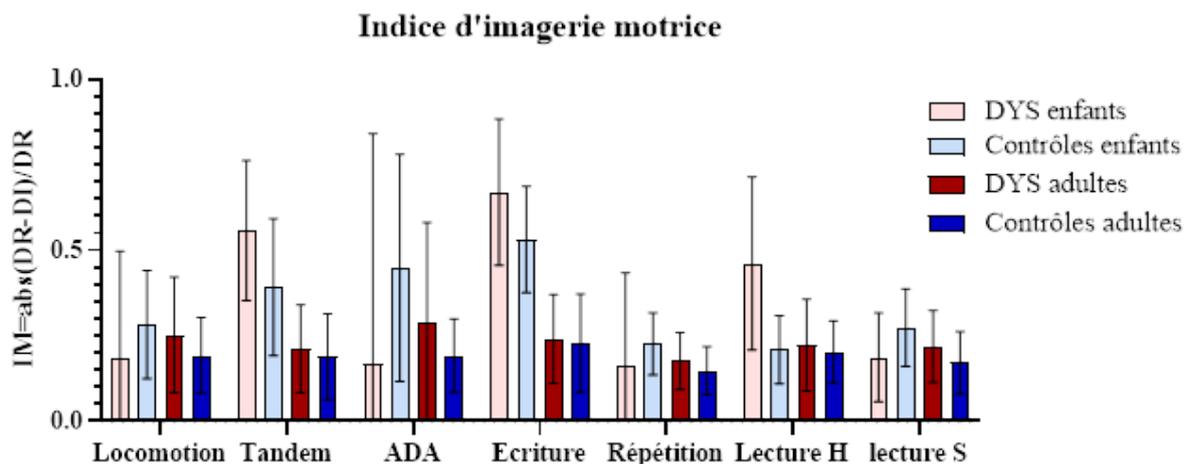


Figure 7 : moyennes et écarts types des indices d'imagerie motrice (IM) dans les groupes des enfants dys (en rose), enfants contrôles (en bleu clair), adultes dyslexiques (en rouge), adultes contrôles (en bleu foncé). Tâches isolées.

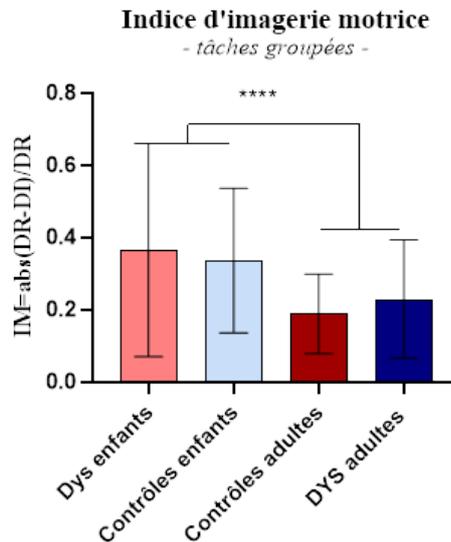


Figure 8 : moyennes et écarts types des indices d'imagerie motrice (IM) dans les groupes des enfants dys (en rose), enfants contrôles (en bleu clair), adultes dyslexiques (en rouge), adultes contrôles (en bleu foncé). Tâches groupées

### 1.5 En résumé

Les enfants au développement typique et les enfants dyslexiques respectent le principe d'isochronie dans la grande majorité des tâches que nous avons testées. Quelle que soit la tâche considérée, les performances des enfants DYS ne sont pas significativement différentes de celles des enfants contrôles, comme l'atteste l'absence de différence pour l'indice d'imagerie motrice. On observe en revanche un effet développemental avec des performances plus faibles et des durées plus longues, des enfants versus adultes.

## 2) MABC-2

Compte-tenu du faible nombre de sujets, une analyse qualitative a été ajoutée à l'analyse quantitative du MABC-2.

### 2.1 Analyse quantitative

Sur les 6 enfants testés, 2 enfants présentent soit des capacités motrices globales à risque (Sujet 1) soit des capacités motrices globales altérées (Sujet 6). Le Sujet 1 présente des résultats faibles aux épreuves de dextérité manuelle (< - 1ET). De son côté, le Sujet 6 manifeste des troubles moteurs lors des épreuves « viser et attraper » et des résultats faibles aux épreuves d'équilibre (< - 1ET). Les 4 autres enfants présentent des compétences motrices globales dans la norme bien que le Sujet 5 échoue les épreuves de dextérité manuelle (- 2ET).

## 2.1 Analyse qualitative

Le Sujet 1, lors de l'épreuve de placement de chevilles, a tendance à prendre deux chevilles en même temps et il en fait tomber une sur la planche. De plus, il a des difficultés à se concentrer lors de l'épreuve de suivi de trajet. Lors de l'épreuve d'équilibre statique, il oscille énormément mais arrive à tenir quelques secondes. Il est intéressant de mentionner que ce sujet est plus âgé que les autres (11 ans 11 mois). Il présente des difficultés pour lacer ses chaussures (questionnaire-« anamnèse ») et un TDAH associé.

Le Sujet 5 fait tomber 2 chevilles lors de la première épreuve, il change de main pour enfiler le lacet et se tient très près de la feuille lors du suivi de trajet. Lors de l'épreuve « attraper à deux mains », il lance la balle de tennis très haut afin de s'aider. Durant l'épreuve d'équilibre sur la planche, il oscille violemment pour essayer de maintenir son équilibre. De plus, il présente des difficultés motrices dans sa vie quotidienne. Le questionnaire-« anamnèse » rapporte qu'il a des difficultés pour lacer ses chaussures et boutonner correctement ses habits. Enfin, lors des deux entretiens, sa posture « debout » statique et dynamique (marche) était atypique (pieds rentrés vers l'intérieur).

Le Sujet 6 s'aide de son corps à deux reprises lors du placement de chevilles, il change de main pour enfiler le lacet, utilise une force excessive lors du suivi de trajet, oscille violemment pour essayer de maintenir son équilibre lors de la marche talon-pointe et va trop vite pour être précis lors des sauts à cloche-pied. Il est à noter qu'il présente un TDAH associé ainsi qu'une prise en charge en psychomotricité (mais aucun diagnostic de dyspraxie n'a été posé). Lors de notre rencontre, un bilan orthoptique était en cours.

## **DISCUSSION**

L'objectif de notre étude était d'explorer la qualité des représentations sensorimotrices chez les enfants dyslexiques, en la comparant à celle des enfants normolecteurs.

### **1) Interprétation des résultats du paradigme de chronométrie mentale**

En ce qui concerne le paradigme de chronométrie mentale, le faible effectif de sujets de notre étude, en lien avec le contexte sanitaire actuel, ne nous permet pas d'évoquer de significativité lors de l'interprétation des résultats chez les enfants. Nous pouvons néanmoins observer des tendances qui donnent des informations intéressantes quant à la suite des études à mener dans ce domaine.

Tout d'abord, un effet développemental est significativement retrouvé pour 1. le temps d'exécution, les enfants sont plus lents que les adultes ; 2. la variabilité d'exécution, les enfants sont plus variables et 3. les compétences d'imagerie motrice sont inférieures chez les enfants en comparaison avec les adultes. Ainsi, les représentations sensorimotrices se construisent sur la base d'un répertoire interne de stratégies motrices et de nos interactions avec l'environnement. Elles font l'objet d'une lente maturation qui s'étend sur plusieurs années de l'enfance à l'adolescence (Assaiante et al., 2014).

Cette étude met en avant le fait que les représentations sensorimotrices sont présentes et fonctionnelles chez les enfants entre 8 et 11 ans, mais qu'elles ne sont pas encore matures. Elles atteindront plus tard le niveau optimal retrouvé chez les adultes.

Les durées des actions réalisées mettent en évidence une influence significative de l'âge, ainsi que de la dyslexie toutes tâches confondues. Ainsi, les adultes normolecteurs présentent les durées d'exécutions les plus courtes. La tâche d'écriture apparaît nettement ralentie chez les enfants des deux groupes comparés aux adultes. L'écriture étant une tâche complexe et pour laquelle les enfants, dyslexiques ou non, sont encore en cours d'apprentissage, son exécution est plus laborieuse. Par ailleurs, chez les enfants dyslexiques, de manière attendue, on note un ralentissement dans l'épreuve de lecture à voix haute. En effet, la régulation de la vitesse pourrait s'apparenter à une stratégie développementale pour s'adapter à la difficulté de la tâche (Assaiante et Amblard, 1995).

#### *Une qualité de représentation efficiente chez les enfants dyslexiques*

Concernant les indices d'imagerie motrice chez les enfants dyslexiques et normolecteurs, on observe une différence plus importante entre les durées d'actions réalisées et imaginées pour les épreuves de marche en tandem et d'écriture. Cela semble témoigner que ces tâches sont encore en cours d'acquisition. Cependant, on remarque que les deux groupes d'enfants ont su réactualiser leurs représentations internes pour l'épreuve de tandem : le temps est nettement surestimé par rapport à une locomotion normale (bien que la réactualisation soit moindre pour le groupe des enfants dyslexiques). Cela témoigne de la relative efficacité de leurs représentations sensorimotrices permettant une intégration de l'allongement du facteur temporel nécessaire. Par ailleurs, on observe spécifiquement, chez les enfants dyslexiques, une imagerie motrice moins efficiente pour l'épreuve de lecture à voix haute, tâche connue pour être particulièrement difficile pour eux. De plus, les différences de résultats de l'indice d'imagerie motrice observées chez les enfants dyslexiques, entre l'épreuve de répétition et de lecture à voix haute, pourrait s'expliquer par la complexité de cette dernière. Effectivement, la lecture à voix haute équivaut à une double tâche comprenant le déchiffrement phonémique et la production orale. Enfin, ces résultats mettent en lumière que le temps de l'action imaginée semble toujours sous-estimé par rapport à l'action réalisée.

#### *Evaluation subjective de la difficulté du protocole*

Le questionnaire de ressentis proposé aux enfants, à la suite du protocole d'imagerie motrice, leur permettait de situer leur niveau de difficulté lors de la réalisation de chaque item d'imagerie motrice sur une échelle allant de -3 à 3 (avec -3 : très difficile ; -2 : difficile ; -1 : assez difficile ; 0 : neutre ; 1 : assez facile ; 2 : facile ; 3 : très facile). De manière générale, les sujets dyslexiques de l'étude ont tendance à donner un meilleur ressenti sur les épreuves d'imagerie motrice que les sujets normolecteurs. En effet, ils sont moins nombreux à donner un score négatif sur l'échelle pour chaque épreuve. Et pourtant, les résultats concernant les indices d'imagerie motrice révèlent des performances relativement identiques entre le groupe normolecteur et le groupe dyslexique, hormis pour l'épreuve de lecture à voix haute. De plus, chez les normolecteurs, le ressenti négatif pour les épreuves de marche en tandem et d'écriture est corrélé à une imagerie motrice moins performante. Cet effet ne se retrouve pas dans le groupe des dyslexiques, où les difficultés ressenties ne sont pas particulièrement le reflet de leurs résultats obtenus aux épreuves d'imagerie motrice.

Ce même questionnaire avait été proposé aux adultes normolecteurs et dyslexiques (Marchetti et al., soumis). Il en était ressorti, qu'à l'inverse des enfants, les adultes dyslexiques ressentaient plus de difficultés lors de la réalisation des tâches d'imagerie motrice par comparaison aux adultes normolecteurs, malgré des performances similaires. Au vu de ces différences observées entre les

enfants et adultes dyslexiques, nous pouvons émettre plusieurs hypothèses : la première concerne le rôle joué par l'estime de soi. Un sentiment de moins bonnes capacités pourrait être plus ancré chez ces adultes comparé aux enfants dyslexiques. La seconde concerne la perception et l'évaluation de la difficulté d'une tâche chez les enfants dyslexiques. Ils pourraient avoir une moins bonne capacité à se rendre compte de la réelle difficulté ou non d'une tâche. Cependant, en l'absence d'un effectif de sujets suffisamment grand, ces pistes de réflexions nécessitent d'être approfondies pour pouvoir être affirmées ou infirmées. Les derniers items de ce questionnaire nous donnent des informations sur l'investissement du principe de l'imagerie motrice en vie quotidienne. Ils nous montrent que ces stratégies d'imagerie motrice sont utilisées par les deux groupes d'enfants, dans le cadre d'activités sportives ou ludiques. Effectivement, ils sont nombreux à exprimer avoir l'habitude de s'imaginer en train de jouer au foot, au basket, faire de la danse, jouer au parc etc. Cette stratégie est aussi investie par les enfants du groupe normolecteur pour l'apprentissage de leurs leçons ou de leurs poésies. Cependant, elle est beaucoup moins utilisée chez les enfants du groupe de dyslexiques, s'agissant des activités scolaires.

## **2) Interprétation des résultats du MABC-2**

Quantitativement, les résultats du MABC-2 mettent en lumière des capacités motrices à risque ( $< -1$  ET) ou altérées ( $- 2$ ET) chez 2 enfants dyslexiques testés sur 6. Il est à mentionner que ces deux sujets présentaient un TDAH associé et que les troubles de l'attention majoraient les troubles moteurs. Qualitativement, on note des difficultés chez 3 enfants sur les 6 que ce soit lors des épreuves dirigées mais également dans leur vie quotidienne (d'après le questionnaire-« anamnèse »). Bien que l'échantillon soit très faible, cette proportion de troubles moteurs parmi les enfants dyslexiques est fidèle aux données retrouvées dans la littérature. En effet, la comorbidité avec la dyspraxie est retrouvée chez 20 %, 59 % voire 63% des enfants dyslexiques (Kaplan et al., 1998; Ramus et al., 2003a; White et al., 2006). La proportion de la co-occurrence entre la dyslexie et la dyspraxie est très variable, notamment selon les pays et leur manière de dépister le trouble. Par exemple, contrairement à certains pays faisant un dépistage moteur systématique, la France poserait davantage le diagnostic de dyspraxie suite à une plainte liée à la qualité de vie quotidienne (INSERM, 2019). Ainsi, il est possible que les enfants présentant des troubles moteurs ou des capacités motrices à risque soient sous-estimés en France. De plus, l'impact des troubles en vie quotidienne dépend de la culture et des activités pratiquées. Par exemple, les activités sportives, à travers lesquelles d'éventuels troubles moteurs sont plus enclins à se manifester, sont plus ou moins proposées dans le milieu scolaire en fonction des pays (INSERM, 2019).

## **3) Limites**

La principale limite de notre étude est le peu de sujets enfants que nous avons pu recruter du fait de la pandémie de Covid-19. Tout d'abord, pour répondre à notre problématique, notre objectif initial était de former trois groupes d'enfants distincts (normolecteurs / dyslexiques sans troubles moteurs / dyslexiques avec troubles moteurs). Le paradigme de chronométrie mentale aurait permis de comparer les données d'imagerie motrice et de mettre en évidence de possibles différences de qualité des représentations sensorimotrices entre les groupes. N'ayant pas pu former le second sous-groupe comorbide, notre comparaison s'est limitée aux normolecteurs et aux dyslexiques. Par ailleurs, le faible

effectif au sein des groupes d'enfants n'a pas permis une analyse statistique significative, même si ces premiers résultats sont encourageants. Un recrutement supplémentaire d'enfants, dans des proportions similaires à celles des adultes, devrait nous permettre de mettre en évidence un effet de la dyslexie sur la qualité des représentations sensorimotrices, comme cela est le cas chez l'adulte pour le groupe des comorbides.

## **CONCLUSION ET PERSPECTIVES**

Malgré ses limites, notre mémoire apporte néanmoins des pistes prometteuses en mettant en évidence un possible effet de la dyslexie sur la qualité des représentations sensorimotrices chez l'enfant.

Au vu de la fréquence d'association de la dyslexie avec la dyspraxie, la mise en place d'un dépistage et d'une orientation adaptée semblent indispensables. En effet, de la même manière que les troubles de la lecture peuvent avoir des répercussions sur la vie scolaire, universitaire et professionnelle des personnes dyslexiques, les troubles associés peuvent à leur tour accroître ces répercussions et aggraver le pronostic à long terme du trouble. En effet, Kirby et al. (2013) ont étudié 59 adultes dyspraxiques (ou suspectés de l'être) avec ou sans activité professionnelle. Ils ont montré que, malgré la présence ou non d'un emploi, les deux groupes d'adultes présentaient un niveau élevé de symptômes dépressifs, une faible qualité de vie et de l'anxiété.

D'un point de vue clinique, une meilleure appréciation du rôle des représentations sensorimotrices dans les apprentissages et l'intégration de cette notion dans notre approche orthophonique semble pertinente pour optimiser la prise en soin.

Enfin, de futures recherches avec un échantillon plus important et des tâches d'imagerie motrice plus complexes intégrant une contrainte temporelle permettraient la mise en lumière d'une éventuelle association des troubles phonologiques chez l'enfant dyslexique avec une atteinte plus générale des représentations sensorimotrices.

## **BIBLIOGRAPHIE**

- Adams, I., Ferguson, G., Lust, J., Steenbergen, B. et Smits-Engelsman, B. (2016). Action planning and position sense in children with Developmental Coordination Disorder. *Human Movement Science*, (accepted). <https://doi.org/10.1016/j.humov.2016.01.006>
- Ajuriaguerra, J. D. (1974). *Manuel de psychiatrie de l'enfant* (Masson).
- Akshoomoff, N. A., Courchesne, E. et Townsend, J. (1997). Attention coordination and anticipatory control. *International review of neurobiology*, 41, 575-598.
- American Psychiatric Association. (2013). Diagnostic and statistical manual of disorders, 5th ed.
- Anthoni, H., Zucchelli, M., Matsson, H., Müller-Myhsok, B., Fransson, I., Schumacher, J., Massinen, S., Onkamo, P., Warnke, A., Griesemann, H., Hoffmann, P., Nopola-Hemmi, J., Lyytinen, H., Schulte-Körne, G., Kere, J., Nöthen, M. et Peyrard-Janvid, M. (2007). A locus on 2p12 containing the co-regulated MRPL19 and C2ORF3 genes is associated to dyslexia. *Human Molecular Genetics*, 16, 667-677.
- Assaiante, C. (2014). *Développement perceptivo-moteur : postures et actions*. Encyclopædia Universalis. <https://www.universalis.fr/encyclopedie/developpement-perceptivo-moteur-postures-et-actions/>
- Assaiante, C., Barlaam, F., Cignetti, F. et Vaugoyeau, M. (2014). Body schema building during childhood and adolescence: A neurosensory approach. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*, 44(1), 3-12. <https://doi.org/10.1016/j.neucli.2013.10.125>
- Assaiante, Ch et Amblard, B. (1995). An ontogenetic model for the sensorimotor organization of balance control in humans. *Human Movement Science*, 14(1), 13-43.
- Assaiante, Christine. (2020). Faire avec son corps qui change : construction du schéma corporel chez l'enfant et l'adolescent. *Numéro spécial ANAE « Corps, espaces et apprentissages chez l'enfant et l'adolescent »*, (168), 535-542.
- Assaiante, C. parmi le Groupe d'experts. (2019). Expertise collective : Dyspraxie : synthèse et recommandations. Institut thématique INSERM. Ecriture du chapitre : développement sensorimoteur chez l'enfant TDC (30 pages). Décembre 2019.
- Barlaam, F., Fortin, C., Vaugoyeau, M., Schmitz, C. et Assaiante, C. (2012). Development of action representation during adolescence as assessed from anticipatory control in a bimanual load-lifting task. *Neuroscience*, 221, 56-68. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2012.06.062>
- Barnes, K. A., Howard Jr, J. H., Howard, D. V., Kenealy, L. et Vaidya, C. J. (2010). Two forms of implicit learning in childhood ADHD. *Developmental neuropsychology*, 35(5), 494-505.
- Bernardi, M., Leonard, H. C., Hill, E. L. et Henry, L. A. (2016). Brief report: Response inhibition and processing speed in children with motor difficulties and developmental coordination disorder. *Child Neuropsychology*, 22(5), 627-634.
- Biederman, Newcorn et Sprich. (1991). Comorbidity of attention deficit hyperactivity disorder with conduct, depressive, anxiety, and other disorders. *American Journal of Psychiatry*, 148(5), 564-577. <https://doi.org/10.1176/ajp.148.5.564>
- Biotteau, M., Chaix, Y. et Albaret, J.-M. (2015). Procedural learning and automatization process in children with developmental coordination disorder and/or developmental dyslexia. *Human movement science*, 43, 78-89.

- Biotteau, M., Péran, P., Vayssière, N., Tallet, J., Albaret, J.-M. et Chaix, Y. (2016). Neural changes associated to procedural learning and automatization process in developmental coordination disorder and/or developmental dyslexia. *European journal of paediatric neurology*, 21(2), 286-299.
- Bishop, D. V. M. (2007). Using mismatch negativity to study central auditory processing in developmental language and literacy impairments: where are we, and where should we be going? *Psychological bulletin*, 133(4), 651.
- Bishop, Dorothy V. M. et Snowling, M. J. (2004). Developmental Dyslexia and Specific Language Impairment: Same or Different? *Psychological Bulletin*, 130(6), 858-886.  
<https://doi.org/10.1037/0033-2909.130.6.858>
- Blakemore, S.-J. (2012). Imaging brain development: the adolescent brain. *Neuroimage*, 61(2), 397-406.
- Blouin, J., Bard, C., Teasdale, N., Paillard, J., Fleury, M., Forget, R. et Lamarre, Y. (1993). Reference systems for coding spatial information in normal subjects and a deafferented patient. *Experimental Brain Research*, 93(2), 324-331.
- Boets, B., Wouters, J., Van Wieringen, A., De Smedt, B. et Ghesquiere, P. (2008). Modelling relations between sensory processing, speech perception, orthographic and phonological ability, and literacy achievement. *Brain and language*, 106(1), 29-40.
- Bonte, M. L. et Blomert, L. (2004). Developmental dyslexia: ERP correlates of anomalous phonological processing during spoken word recognition. *Cognitive brain research*, 21(3), 360-376.
- Borsting, E., Ridder, W. H., Dudeck, K., Kelley, C., Matsui, L. et Motoyama, J. (1996). The presence of a magnocellular defect depends on the type of dyslexia. *Vision Research*, 36(7), 1047-1053. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(95\)00199-9](https://doi.org/10.1016/0042-6989(95)00199-9)
- Bosman, A. M. T. et Van Orden, G. (1997). Why Spelling is More Difficult than Reading, 19.
- Bosse, M.-L., Tainturier, M. J. et Valdois, S. (2007). Developmental dyslexia: The visual attention span deficit hypothesis. *Cognition*, 104(2), 198-230.
- Bouma, H. (1970). Interaction effects in parafoveal letter recognition. *Nature*, 226(5241), 177-178.
- Bouma, H. et Legein, C. P. (1977). Foveal and parafoveal recognition of letters and words by dyslexics and by average readers. *Neuropsychologia*, 15(1), 69-80.
- Brenneman, M. H., Decker, S., Meyers, J. et Johnson, K. (2008). Does a continuous measure of handedness predict reading processes and reading-related skills across the lifespan? *Laterality: Asymmetries of Body, Brain and Cognition*, 13(6), 481-503.  
<https://doi.org/10.1080/13576500802164133>
- Campbell, R. et Sais, E. (1995). Accelerated metalinguistic (phonological) awareness in bilingual children. *British Journal of Developmental Psychology*, 13(1), 61-68.  
<https://doi.org/10.1111/j.2044-835X.1995.tb00664.x>
- Casile, A. et Giese, M. A. (2006). Nonvisual motor training influences biological motion perception. *Current Biology*, 16(1), 69-74.
- Castles, A. et Coltheart, M. (1993). Varieties of developmental dyslexia. *Cognition*, 47(2), 149-180.  
[https://doi.org/10.1016/0010-0277\(93\)90003-E](https://doi.org/10.1016/0010-0277(93)90003-E)

- Castles, A. et Coltheart, M. (2004). Is there a causal link from phonological awareness to success in learning to read?, 35.
- Castles, A., Datta, H., Gayan, J. et Olson, R. K. (1999). Varieties of Developmental Reading Disorder: Genetic and Environmental Influences. *Journal of Experimental Child Psychology*, 72(2), 73-94. <https://doi.org/10.1006/jecp.1998.2482>
- Catts, H. W., Fey, M. E., Tomblin, J. B. et Zhang, X. (2002). A Longitudinal Investigation of Reading Outcomes in Children With Language Impairments. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 45(6), 1142-1157. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2002/093\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2002/093))
- Chaix, Y. et Albaret, J.-M. (2013). Trouble de l'Acquisition de la Coordination et déficits visuo-spatiaux. *Développements*, (2), 32-43.
- Chaix, Y., Valdois, S., Habib, M., Albaret, J.-M., Barry, I. et Biotteau, M. (2017). *Dyslexies développementales : évidence et nouveautés*.
- Choudhury, S., Charman, T., Bird, V. et Blakemore, S.-J. (2007). Adolescent development of motor imagery in a visually guided pointing task. *Consciousness and Cognition*, 16(4), 886-896.
- Cignetti, F., Fontan, A., Menant, J., Nazarian, B., Anton, J.-L., Vaugoyeau, M. et Assaiante, C. (2016). Protracted Development of the Proprioceptive Brain Network During and Beyond Adolescence. *Cerebral Cortex*, bhv323. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhv323>
- Cignetti, F., Vaugoyeau, M., Decker, L. M., Grosbras, M.-H., Girard, N., Chaix, Y., Péran, P. et Assaiante, C. (2018). Brain network connectivity associated with anticipatory postural control in children and adults. *Cortex*, 108, 210-221. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2018.08.013>
- Coltheart, M., Rastle, K., Perry, C., Langdon, R. et Ziegler, J. (2001). DRC: A dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychological Review*, 108(1), 204-256. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.108.1.204>
- Cuvellier, J. C., Pandit, F., Casalis, S., Lemaître, M. P., Cuisset, J. M., Platof, A. et Vallée, L. (2004). Analyse d'une population de 100 enfants adressés pour troubles d'apprentissage scolaire. *Archives de Pédiatrie*, 11(3), 201-206. <https://doi.org/10.1016/j.arcped.2003.12.004>
- Decety, J., Grezes, J., Costes, N., Perani, D., Jeannerod, M., Procyk, E., Grassi, F. et Fazio, F. (1997). Brain activity during observation of actions. Influence of action content and subject's strategy. *Brain: a journal of neurology*, 120(10), 1763-1777.
- Decety, J., Jeannerod, M. et Prablanc, C. (1989). The timing of mentally represented actions. *Behavioural brain research*, 34(1-2), 35-42.
- Decety, J., Perani, D., Jeannerod, M., Bettinardi, V., Tadary, B., Woods, R., Mazziotta, J. C. et Fazio, F. (1994). Mapping motor representations with positron emission tomography. *Nature*, 371(6498), 600-602.
- Démonet, J.-F., Taylor, M. J. et Chaix, Y. (2004). Developmental dyslexia. *The Lancet*, 363(9419), 1451-1460.
- Di Pellegrino, G., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V. et Rizzolatti, G. (1992). Understanding motor events: A neurophysiological study. *Experimental brain research. Experimentelle Hirnforschung. Expérimentation cérébrale*, 91, 176-80. <https://doi.org/10.1007/BF00230027>
- Dijkerman, H. C. et De Haan, E. H. (2007). Somatosensory processes subserving perception and action. *Behavioral and brain sciences*, 30(2), 189.

- Dufor, O., Serniclaes, W., Sprenger-Charolles, L. et Démonet, J.-F. (2009). Left premotor cortex and allophonic speech perception in dyslexia: A PET study. *NeuroImage*, 46(1), 241-248. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.01.035>
- Elbro, C. (1998). When reading is "readn" or somthn. Distinctness of phonological representations of lexical items in normal and disabled readers. *Scandinavian journal of Psychology*, 39(3), 149-153.
- Elbro, Carsten, Nielsen, I. et Petersen, D. K. (1994). Dyslexia in adults: Evidence for deficits in non-word reading and in the phonological representation of lexical items. *Annals of Dyslexia*, 44(1), 203-226. <https://doi.org/10.1007/BF02648162>
- Emerson, E., Azmi, S. et Hatton, C. (1997). Is there an increased prevalence of severe learning disabilities among British Asians? *Ethnicity & Health*, 2, 317-321.
- Esser, G. et Schmidt, M. (1994). Children with specific reading retardation-early determinants and long-term outcome. *Acta Paedopsychiatrica*, 229-237.
- Facoetti, A. et Molteni, M. (2001). The gradient of visual attention in developmental dyslexia. *Neuropsychologia*, 39(4), 352-357.
- Facoetti, A., Trussardi, A. N., Ruffino, M., Lorusso, M. L., Cattaneo, C., Galli, R., Molteni, M. et Zorzi, M. (2010). Multisensory spatial attention deficits are predictive of phonological decoding skills in developmental dyslexia. *Journal of cognitive neuroscience*, 22(5), 1011-1025.
- Flanagan, J. R. et Wing, A. M. (1990). The stability of precision grip forces during cyclic arm movements with a hand-held load. *Experimental brain research*, 105(3), 455-464.
- Fontan, A. (2017). *La construction du schéma corporel dans un cerveau en développement*. Aix-Marseille.
- Frith, C. D., Friston, K. J., Liddle, P. F. et Frackowiak, R. S. (1991). Willed action and the prefrontal cortex in man: a study with PET. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 244(1311), 241-246.
- Galaburda, A. M., LoTurco, J., Ramus, F., Fitch, R. H. et Rosen, G. D. (2006). From genes to behavior in developmental dyslexia. *Nature Neuroscience*, 9(10), 1213-1217. <https://doi.org/10.1038/nn1772>
- Galaburda, A. M., Sherman, G. F., Rosen, G. D., Aboitiz, F. et Geschwind, N. (1985). Developmental dyslexia: Four consecutive patients with cortical anomalies. *Annals of Neurology*, 18(2), 222-233. <https://doi.org/10.1002/ana.410180210>
- Genard, N., Alegria, J., Albaret, J. et Morais, J. (1998). Methods to establish subtypes of developmental dyslexia. In Problems and interventions in literacy development. *Problems and interventions in literacy development*, 163-176.
- Gerardin, E., Sirigu, A., Lehericy, S., Poline, J.-B., Gaymard, B., Marsault, C., Agid, Y. et Le Bihan, D. (2000). Partially overlapping neural networks for real and imagined hand movements. *Cerebral cortex*, 10(11), 1093-1104.
- Geschwind, N. et Galaburda. (1984). Cerebral Dominance. *Harvard University Press*, 213.
- Geuze, R. H. (2008). *Le trouble de l'acquisition de la coordination : évaluation et rééducation de la maladresse chez l'enfant* (Solal).

- Gheysen, F., Van Waelvelde, H. et Fias, W. (2011). Impaired visuo-motor sequence learning in developmental coordination disorder. *Research in developmental disabilities*, 32(2), 749-756.
- Glickstein, M. et Yeo, C. (1990). The cerebellum and motor learning. *Journal of cognitive neuroscience*, 2(2), 69-80.
- Goodale, M. et Milner, D. A. (1992). Separate visual pathways for perception and action. *Trends in Neurosciences*, 15(1), 20-25. [https://doi.org/10.1016/0166-2236\(92\)90344-8](https://doi.org/10.1016/0166-2236(92)90344-8)
- Goswami, U., Thomson, J., Richardson, U., Stainthorp, R., Hughes, D., Rosen, S. et Scott, S. K. (2002). Amplitude envelope onsets and developmental dyslexia: A new hypothesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(16), 10911-10916. <https://doi.org/10.1073/pnas.122368599>
- Grabski, K. et Sato, M. (2020). Adaptive phonemic coding in the listening and speaking brain. *Neuropsychologia*, 136, 107267.
- Grafton, S. T., Arbib, M. A., Fadiga, L. et Rizzolatti, G. (1996). Localization of grasp representations in humans by positron emission tomography. *Experimental brain research*, 112(1), 103-111.
- Grainger, J., Lété, B., Bertand, D., Dufau, S. et Ziegler, J. C. (2012). Evidence for multiple routes in learning to read. *Cognition*, 123(2), 280-292. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2012.01.003>
- Grasso, R., Assaiante, C., Prevost, P. et Berthoz, A. (1998). Development of anticipatory orienting strategies during locomotor tasks in children. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 22(4), 533-539.
- Griffiths, S. et Frith, U. (2002). Evidence for an articulatory awareness deficit in adult dyslexics. *Dyslexia*, 8(1), 14-21.
- Griffiths, Y. M. et Snowling, M. J. (2002). Predictors of exception word and nonword reading in dyslexic children: The severity hypothesis. *Journal of Educational Psychology*, 94(1), 34-43. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.94.1.34>
- Habib, M. (2003). *La dyslexie à livre ouvert*.
- Haggard, P. et Wolpert, D. M. (2005). *Disorders of body scheme*.
- Hairston, W. D., Burdette, J. H., Flowers, D. L., Wood, F. B. et Wallace, M. T. (2005). Altered temporal profile of visual-auditory multisensory interactions in dyslexia. *Experimental Brain Research*, 166(3-4), 474-480.
- Hämäläinen, J. A., Salminen, H. K. et Leppänen, P. H. (2013). Basic auditory processing deficits in dyslexia: systematic review of the behavioral and event-related potential/field evidence. *Journal of learning disabilities*, 46(5), 413-427.
- Hannula-Jouppi. (2005). The Axon Guidance Receptor Gene ROBO1 Is a Candidate Gene for Developmental Dyslexia.
- Hari, R. et Renvall, H. (2001). Impaired processing of rapid stimulus sequences in dyslexia. *Trends in cognitive sciences*, 5(12), 525-532.
- Harm, M. W. et Seidenberg, M. S. (1999). Phonology, Reading Acquisition, and Dyslexia: Insights from Connectionist Models. *Psychological Review*, 106(3), 491-528.
- Hayes, E. A., Tiippana, K., Nicol, T. G., Sams, M. et Kraus, N. (2003). Integration of heard and seen speech: a factor in learning disabilities in children. *Neuroscience Letters*, 351(1), 46-50.

- Head, H. et Holmes, G. (1911). Sensory disturbances from cerebral lesions. *Brain*, 34(2-3), 102-254.
- Henderson, S. E., Sugden, D. A. et Barnett, A. L. (2007). *Movement assessment battery for children* (vol. 26). Harcourt Assessment London.
- Hoefl, F., Hernandez, A., McMillon, G., Taylor-Hill, H., Martindale, J. L., Meyler, A., Keller, T. A., Siok, W. T., Deutsch, G. K., Just, M. A., Whitfield-Gabrieli, S. et Gabrieli, J. D. E. (2006). Neural Basis of Dyslexia: A Comparison between Dyslexic and Nondyslexic Children Equated for Reading Ability. *Journal of Neuroscience*, 26(42), 10700-10708. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4931-05.2006>
- Iacoboni, M., Molnar-Szakacs, I., Gallese, V., Buccino, G., Mazziotta, J. C. et Rizzolatti, G. (2005). Grasping the Intentions of Others with One's Own Mirror Neuron System. *PLOS Biology*, 3(3), e79. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0030079>
- INSERM. (2019). *Trouble développemental de la coordination ou dyspraxie*.
- INSERM. (2007b). Expertise collective : Dyslexie, dysorthographe, dyscalculie: bilan des données scientifiques, 863.
- Jacobs, A., Pinto, J. et Shiffrar, M. (2004). Experience, context, and the visual perception of human movement. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 30(5), 822.
- Jantzen, K. J., Steinberg, F. L. et Kelso, J. A. S. (2005). Functional MRI reveals the existence of modality and coordination-dependent timing networks. *NeuroImage*, 25(4), 1031-1042. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.12.029>
- Jeannerod, M. (1994). The representing brain: Neural correlates of motor intention and imagery. *Behavioral and Brain sciences*, 17(2), 187-201.
- Jeannerod, M. (2001). Neural simulation of action: a unifying mechanism for motor cognition. *Neuroimage*, 14(1), S103-S109.
- Jeannerod, M. (2009). *Le Cerveau volontaire*. Odile Jacob.
- Jeannerod, M. et Decety, J. (1995). Mental motor imagery: a window into the representational stages of action. *Current Opinion in Neurobiology*, 5(6), 727-732. [https://doi.org/10.1016/0959-4388\(95\)80099-9](https://doi.org/10.1016/0959-4388(95)80099-9)
- Jensen, A. R. (2006). *Clocking the mind: Mental chronometry and individual differences*. Elsevier.
- Jiménez, J. E., Rodríguez, C. et Ramírez, G. (2009). Spanish developmental dyslexia: Prevalence, cognitive profile, and home literacy experiences. *Journal of Experimental Child Psychology*, 19.
- Jones, J. A. et Callan, D. E. (2003). Brain activity during audiovisual speech perception: an fMRI study of the McGurk effect. *Neuroreport*, 14(8), 1129-1133.
- Jover, M., Schmitz, C., Centelles, L., Chabrol, B. et Assaiante, C. (2010). Anticipatory postural adjustments in a bimanual load-lifting task in children with developmental coordination disorder. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 52(9), 850-855.
- Kaplan, B. J., N. Wilson, B., Dewey, D. et Crawford, S. G. (1998b). DCD may not be a discrete disorder. *Human Movement Science*, 17(4-5), 471-490. [https://doi.org/10.1016/S0167-9457\(98\)00010-4](https://doi.org/10.1016/S0167-9457(98)00010-4)

- Kere, J. (2011). Molecular genetics and molecular biology of dyslexia: Developmental dyslexia. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, 2(4), 441-448.  
<https://doi.org/10.1002/wcs.138>
- Kirby, A., Williams, N., Thomas, M. et Hill, E. L. (2013). Self-reported mood, general health, wellbeing and employment status in adults with suspected DCD. *Research in developmental disabilities*, 34(4), 1357-1364.
- Kohler, E., Keysers, C., Umiltà, M. A., Fogassi, L., Gallese, V. et Rizzolatti, G. (2002). Hearing sounds, understanding actions: action representation in mirror neurons. *Science*, 297(5582), 846-848.
- Krakauer, J., Ghilardi, M.-F. et Ghez, C. (1999). Independent learning of internal models for kinematic and dynamic control of reaching. *Nature neuroscience*, 2, 1026-31.  
<https://doi.org/10.1038/14826>
- Krishnan, S., Watkins, K. E. et Bishop, D. V. (2016). Neurobiological basis of language learning difficulties. *Trends in cognitive sciences*, 20(9), 701-714.
- Kujala, T. et Näätänen, R. (2001). The mismatch negativity in evaluating central auditory dysfunction in dyslexia. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 25(6), 535-543.  
[https://doi.org/10.1016/S0149-7634\(01\)00032-X](https://doi.org/10.1016/S0149-7634(01)00032-X)
- Lallier, M., Thierry, G. et Tainturier, M.-J. (2013). On the importance of considering individual profiles when investigating the role of auditory sequential deficits in developmental dyslexia. *Cognition*, 126(1), 121-127.
- Lallier, M., Thierry, G., Tainturier, M.-J., Donnadieu, S., Peyrin, C., Billard, C. et Valdois, S. (2009). Auditory and visual stream segregation in children and adults: An assessment of the amodality assumption of the 'sluggish attentional shifting' theory of dyslexia. *Brain Research*, 1302, 132-147. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2009.07.037>
- Lam, S. S. T., Au, R. K. C., Leung, H. W. H. et Li-Tsang, C. W. P. (2011). Chinese handwriting performance of primary school children with dyslexia. *Research in Developmental Disabilities*, 32(5), 1745-1756. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2011.03.001>
- Larroque, B. (2004). Les troubles du développement des enfants grands prématurés mesurés à l'âge scolaire. *Journal de Gynécologie Obstétrique et Biologie de la Reproduction*, 33(6), 475-486. [https://doi.org/10.1016/S0368-2315\(04\)96560-X](https://doi.org/10.1016/S0368-2315(04)96560-X)
- Lebel, C., Walker, L., Leemans, A., Phillips, L. et Beaulieu, C. (2008). Microstructural maturation of the human brain from childhood to adulthood. *Neuroimage*, 40(3), 1044-1055.
- Lebon, F., Gueugneau, N. et Papaxanthis, C. (2013). Modèles internes et imagerie motrice. *Movement & Sport Sciences - Science & Motricité*, 51-61.  
<https://doi.org/10.1051/sm/20103092>
- Lehongre, K., Morillon, B., Giraud, A.-L. et Ramus, F. (2013). Impaired auditory sampling in dyslexia: further evidence from combined fMRI and EEG. *Frontiers in human neuroscience*, 7, 454.
- Lewis, C., Hitch, G. J. et Walker, P. (1994). The Prevalence of Specific Arithmetic Difficulties and Specific Reading Difficulties in 9- to 10-year-old Boys and Girls. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 35(2), 283-292. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.1994.tb01162.x>

- Lindgren, S. D. (1985). Cross-National Comparisons of Developmental Dyslexia in Italy and the United States, 15.
- Livingstone, M. S. (1991). Physiological and anatomical evidence for a magnocellular defect in developmental dyslexia. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 6.
- Llinás, R. (1993). Is Dyslexia a Dyschronia? *Annals of the New York Academy of Sciences*, 682(1 Temporal Info), 48-56. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1993.tb22958.x>
- Lobier, M. A., Peyrin, C., Pichat, C., Le Bas, J.-F. et Valdois, S. (2014). Visual processing of multiple elements in the dyslexic brain: evidence for a superior parietal dysfunction. *Frontiers in human neuroscience*, 8, 479.
- Lobier, M., Dubois, M. et Valdois, S. (2013). The role of visual processing speed in reading speed development. *PloS one*, 8(4), e58097.
- Lobier, M., Zoubrinetzky, R. et Valdois, S. (2012). The visual attention span deficit in dyslexia is visual and not verbal. *cortex*, 48(6), 768-773.
- Locke, J. L. et Macaruso, P. (1999). Handedness in developmental dyslexia: direct observation of a large sample. *Journal of Neurolinguistics*, 12(2), 147-156. [https://doi.org/10.1016/S0911-6044\(99\)00008-1](https://doi.org/10.1016/S0911-6044(99)00008-1)
- Lovegrove, W. J., Bowling, A., Badcock, D. et Blackwood, M. (1980). Specific reading disability: differences in contrast sensitivity as a function of spatial frequency. *Science*, 210(4468), 439-440.
- Lovegrove, W., Martin, F. et Slaghuis, W. (1986). A theoretical and experimental case for a visual deficit in specific reading disability. *Cognitive neuropsychology*, 3(2), 225-267.
- Lum, J. A., Conti-Ramsden, G., Morgan, A. T. et Ullman, M. T. (2014). Procedural learning deficits in specific language impairment (SLI): A meta-analysis of serial reaction time task performance. *Cortex*, 51, 1-10.
- Lum, J. A., Ullman, M. T. et Conti-Ramsden, G. (2013). Procedural learning is impaired in dyslexia: Evidence from a meta-analysis of serial reaction time studies. *Research in developmental disabilities*, 34(10), 3460-3476.
- Lyon, G. R., Shaywitz, S. E. et Shaywitz, B. A. (2003). A definition of dyslexia. *Annals of Dyslexia*, 53(1), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s11881-003-0001-9>
- Manis, F., Seidenberg, M., Doi, L. et McBride-Chang, C. (1996). On the bases of two subtypes of development dyslexia. *Cognition*, 58(2), 157-195.
- Maravita, A., Spence, C. et Driver, J. (2003). Multisensory integration and the body schema: close to hand and within reach. *Current Biology*, 13(13), R531-R539. [https://doi.org/10.1016/S0960-9822\(03\)00449-4](https://doi.org/10.1016/S0960-9822(03)00449-4)
- Marchetti, R., Vaugoyeau, M., Colé, P. et Assaiante, C. (2021). A sensorimotor representation impairment in dyslexic adults : a specific profile of comorbidity. *Submitted to PloS One*.
- Marquet-Doléac, J., Soppelsa, R. et Albaret, J. M. (2016). MABC-2 Batterie d'évaluation du mouvement chez l'enfant-2e édition-adaptation française. *Montreuil. Editions du Centre de Psychologie Appliquée*.
- Martelli, M., Di Filippo, G., Spinelli, D. et Zoccolotti, P. (2009). Crowding, reading, and developmental dyslexia. *Journal of vision*, 9(4), 14-14.

- Massion, J., Ioffe, M., Schmitz, C., Viallet, F. et Gantcheva, R. (1999). Acquisition of anticipatory postural adjustments in a bimanual load-lifting task: normal and pathological aspects. *Experimental Brain Research*, 128(1-2), 229-235.
- Maughan, B., Messer, J., Collishaw, S., Pickles, A., Snowling, M., Yule, W. et Rutter, M. (2009). Persistence of literacy problems: spelling in adolescence and at mid-life. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 50(8), 893-901. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2009.02079.x>
- Maughan, Barbara, Rowe, R., Loeber, R. et Stouthamer-Loeber, M. (2003). Reading Problems and Depressed Mood. *Journal of Abnormal Child Psychology*, 219-229.
- McArthur, G. M., Hogben, J. H., Edwards, V. T., Heath, S. M. et Mengler, E. D. (2000). On the « Specifics » of Specific Reading Disability and Specific Language Impairment. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 41(7), 869-874. <https://doi.org/10.1111/1469-7610.00674>
- McGurk, H. et MacDonald, J. (1976). Hearing lips and seeing voices. *Nature*, 264(5588), 746-748.
- Meng, H., Smith, S. D., Hager, K., Held, M., Liu, J., Olson, R. K., Pennington, B. F., DeFries, J. C., Gelernter, J., O'Reilly-Pol, T., Somlo, S., Skudlarski, P., Shaywitz, S. E., Shaywitz, B. A., Marchione, K., Wang, Y., Paramasivam, M., LoTurco, J. J., Page, G. P. et Gruen, J. R. (2005b). DCDC2 is associated with reading disability and modulates neuronal development in the brain.
- Miall, R. C. et Wolpert, D. M. (1996). Forward Models for Physiological Motor Control. *Neural Networks*, 9(8), 1265-1279. [https://doi.org/10.1016/S0893-6080\(96\)00035-4](https://doi.org/10.1016/S0893-6080(96)00035-4)
- Molinaro, N., Lizarazu, M., Lallier, M., Bourguignon, M. et Carreiras, M. (2016). Out-of-synchrony speech entrainment in developmental dyslexia. *Human Brain Mapping*, 37(8), 2767-2783.
- Morton, S. M. et Bastian, A. J. (2006). Cerebellar contributions to locomotor adaptations during splitbelt treadmill walking. *Journal of Neuroscience*, 26(36), 9107-9116.
- Murdoch, B. E. (2010). The cerebellum and language: historical perspective and review. *Cortex*, 46(7), 858-868.
- Nicolson, R.I. et Fawcett, A. J. (1990). Automaticity: A new framework for dyslexia research? *Cognition*, 35(2), 159-182. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(90\)90013-A](https://doi.org/10.1016/0010-0277(90)90013-A)
- Nicolson, Roderick I. (2011). Dyslexia, dysgraphia, procedural learning and the cerebellum, 11.
- Nicolson, Roderick I. et Fawcett, A. J. (1999). Developmental dyslexia: The role of the cerebellum. *Dyslexia*, 5(3), 155-177.
- Nicolson, Roderick I. et Fawcett, A. J. (2007). Procedural learning difficulties: reuniting the developmental disorders? *Trends in Neurosciences*, 30(4), 135-141. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2007.02.003>
- Nicolson, Roderick I, Fawcett, A. J. et Dean, P. (2001). Developmental dyslexia: the cerebellar deficit hypothesis. *Trends in Neurosciences*, 24(9), 508-511. [https://doi.org/10.1016/S0166-2236\(00\)01896-8](https://doi.org/10.1016/S0166-2236(00)01896-8)
- Nowak, D. A., Topka, H., Timmann, D., Boecker, H. et Hermsdörfer, J. (2007). The role of the cerebellum for predictive control of grasping. *The cerebellum*, 6(1), 7-17.
- Olofsson, Å., Taube, K. et Ahl, A. (2015). Academic achievement of university students with dyslexia. *Dyslexia*, 21(4), 338-349.

- Organisation Mondiale de la Santé. (2001). *Classification multiaxiale des troubles psychiatriques chez l'enfant et l'adolescent : classification CIM-10 des troubles mentaux et des troubles du comportement de l'enfant et de l'adolescent*. (Masson).
- Paillard, J. (1982). Le corps et ses langages d'espace - Nouvelles contributions psychophysiologiques à l'étude du schéma corporel. *Le corps en psychiatrie*, 53-69.
- Paracchini, S., Thomas, A., Castro, S., Lai, C., Paramasivam, M., Wang, Y., Keating, B. J., Taylor, J. M., Hacking, D. F., Scerri, T., Francks, C., Richardson, A. J., Wade-Martins, R., Stein, J. F., Knight, J. C., Copp, A. J., LoTurco, J. et Monaco, A. P. (2006). The chromosome 6p22 haplotype associated with dyslexia reduces the expression of KIAA0319, a novel gene involved in neuronal migration. *Human Molecular Genetics*, 15(10), 1659-1666. <https://doi.org/10.1093/hmg/ddl089>
- Pennington, B. F., Groisser, D. et Welsh, M. C. (2013). Contrasting Cognitive Deficits in Attention Deficit Hyperactivity Disorder Versus Reading Disability.
- Peterson, R. L. et Pennington, B. F. (2012). Developmental dyslexia. *The Lancet*, 379(9830), 1997-2007. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(12\)60198-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(12)60198-6)
- Peterson, R. L., Pennington, B. F. et Olson, R. K. (2013). Subtypes of developmental dyslexia: Testing the predictions of the dual-route and connectionist frameworks. *Cognition*, 126(1), 20-38. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2012.08.007>
- Peterson, R. L., Pennington, B. F., Olson, R. K. et Wadsworth, S. (2015). Longitudinal Stability of Phonological and Surface Subtypes of Developmental Dyslexia, 21.
- Peyrin, C., Démonet, J. F., N'Guyen-Morel, M. A., Le Bas, J. F. et Valdois, S. (2011). Superior parietal lobule dysfunction in a homogeneous group of dyslexic children with a visual attention span disorder. *Brain and language*, 118(3), 128-138.
- Plaut, D. C., McClelland, J. L., Seidenberg, M. S. et Patterson, K. (1996). Understanding Normal and Impaired Word Reading: Computational Principles in Quasi-Regular Domains. *Psychological Review*, 103(1), 56-115.
- Plomin, R. (1994). The Emanuel Miller Memorial Lecture 1993 Genetic Research and Identification of Environmental Influences. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 35(5), 817-834. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.1994.tb02297.x>
- Pringle-Morgan, W. (1896). A case of congenital word blindness. *British Medical Journal*, 2, 1378.
- Ramnani, N. (2006). The primate cortico-cerebellar system: anatomy and function. *Nature reviews neuroscience*, 7(7), 511-522.
- Ramus, F. (2004). Neurobiology of dyslexia: a reinterpretation of the data. *Trends in Neurosciences*, 27(12), 720-726. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2004.10.004>
- Ramus, F. (2003b). Theories of developmental dyslexia: insights from a multiple case study of dyslexic adults. *Brain*, 126(4), 841-865. <https://doi.org/10.1093/brain/awg076>
- Ramus, F., Pidgeon, E. et Frith, U. (2003a). The relationship between motor control and phonology in dyslexic children. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 44(5), 712-722. <https://doi.org/10.1111/1469-7610.00157>
- Ransby, M. J. et Lee Swanson, H. (2003). Reading Comprehension Skills of Young Adults with Childhood Diagnoses of Dyslexia. *Journal of Learning Disabilities*, 36(6), 538-555. <https://doi.org/10.1177/00222194030360060501>

- Renvall, H., Lehtonen, R. et Hari, R. (2005). Abnormal response recovery in the right somatosensory cortex of dyslexic adults. *Cerebral cortex*, 15(5), 507-513.
- Richardson, U., Thomson, J. M., Scott, S. K. et Goswami, U. (2004). Auditory processing skills and phonological representation in Dyslexic children. *Dyslexia*, 10(3), 215-233. <https://doi.org/10.1002/dys.276>
- Richlan, F., Kronbichler, M. et Wimmer, H. (2011). Meta-analyzing brain dysfunctions in dyslexic children and adults. *Neuroimage*, 56(3), 1735-1742.
- Rizzolatti, G. et Arbib, M. A. (1998). Language within our grasp. *Trends in neurosciences*, 21(5), 188-194.
- Rizzolatti, G. et Craighero, L. (2004). The mirror-neuron system. *Annual Review of Neuroscience*, 27(1), 169-192. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.27.070203.144230>
- Roll, J. P. (2005). La Proprioception : un sens premier ?, 14, 6.
- Roll, J.-P., Roll, R. et Velay, J.-L. (1991). Proprioception as a link between body space and extra-personal space. *Brain and space*, 112-132.
- Roth, M., Decety, J., Raybaudi, M., Massarelli, R., Delon-Martin, C., Segebarth, C., Morand, S., Gemignani, A., Décorps, M. et Jeannerod, M. (1996). Possible involvement of primary motor cortex in mentally simulated movement: a functional magnetic resonance imaging study. *Neuroreport*, 7(7), 1280-1284.
- Rourke, B. P. (1995). *Syndrome of nonverbal learning disabilities: Neurodevelopmental manifestations*. (Guilford Press).
- Rubia, K. et Smith, A. (2004). The neural correlates of cognitive time management: a review. *Acta neurobiologiae experimentalis*, 64(3), 329-340.
- Ruffino, M., Gori, S., Boccardi, D., Molteni, M. et Facoetti, A. (2014). Spatial and temporal attention in developmental dyslexia. *Frontiers in human neuroscience*, 8, 331.
- Ruthruff, E., Allen, P. A., Lien, M.-C. et Grabbe, J. (2008). Visual word recognition without central attention: Evidence for greater automaticity with greater reading ability. *Psychonomic Bulletin & Review*, 15(2), 337-343.
- Rutter, M., Caspi, A., Fergusson, D., Horwood, L. J., Goodman, R., Maughan, B., Moffitt, T. E., Meltzer, H. et Carroll, J. (2004). Sex Differences in Developmental Reading Disability: New Findings From 4 Epidemiological Studies. *JAMA*, 291(16), 2007. <https://doi.org/10.1001/jama.291.16.2007>
- Ryding, E., Decety, J., Sjöholm, H., Stenberg, G. et Ingvar, D. H. (1993). Motor imagery activates the cerebellum regionally. A SPECT rCBF study with 99mTc-HMPAO. *Cognitive Brain Research*, 1(2), 94-99.
- Scerrati, E., Baroni, G., Borghi, A. M., Galatolo, R., Lugli, L. et Nicoletti, R. (2015). The modality-switch effect: visually and aurally presented prime sentences activate our senses. *Frontiers in Psychology*, 6, 1668.
- Schadler, M. et Thissen, D. M. (1981). The development of automatic word recognition and reading skill. *Memory & Cognition*, 9(2), 132-141.
- Schmitz, C. et Assaiante, C. (2002). Developmental sequence in the acquisition of anticipation during a new co-ordination in a bimanual load-lifting task in children. *Neuroscience Letters*, 330(3), 215-218. [https://doi.org/10.1016/S0304-3940\(02\)00590-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3940(02)00590-6)

- Schulte-Körne, G., Deimel, W., Bartling, J. et Remschmidt, H. (1998). Auditory processing and dyslexia: evidence for a specific speech processing deficit. *Neuroreport*, 9(2), 337-340.
- Schutter, D. J. et van Honk, J. (2009). The cerebellum in emotion regulation: a repetitive transcranial magnetic stimulation study. *The Cerebellum*, 8(1), 28-34.
- Schwartz, J.-L., Basirat, A., Ménard, L. et Sato, M. (2012). The Perception-for-Action-Control Theory (PACT): A perceptuo-motor theory of speech perception. *Journal of Neurolinguistics*, 25(5), 336-354. <https://doi.org/10.1016/j.jneuroling.2009.12.004>
- Seidenberg, M. et McClelland, J. (1989). A distributed, developmental model of word recognition and naming. *Psychological Review*, 96 (4), 523.
- Semrud-Clikeman, M., Biederman, J., Sprich-Buckminster, S., Lehman, B. K., Faraone et Norman. (1992). Comorbidity between ADHD and learning disability: A review and report in a clinically referred sample. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 31(3), 439-448.
- Serniclaes, W., Sprenger-Charolles, L., Carré, R. et Demonet, J.-F. (2001). Perceptual discrimination of speech sounds in developmental dyslexia.
- Serniclaes, W., Van Heghe, S., Mousty, P., Carré, R. et Sprenger-Charolles, L. (2004). Allophonic mode of speech perception in dyslexia. *Journal of experimental child psychology*, 87(4), 336-361.
- Shaywitz, S. E., Fletcher, J. M., Holahan, J. M., Shneider, A. E., Marchione, K. E., Stuebing, K. K., Francis, D. J., Pugh, K. R. et Shaywitz, B. A. (1999). Persistence of Dyslexia: The Connecticut Longitudinal Study at Adolescence. *PEDIATRICS*, 104(6), 1351-1359. <https://doi.org/10.1542/peds.104.6.1351>
- Silva, P. A., McGee, R. et Williams, S. M. (1983). Developmental language delay from three to seven years and its significance for low intelligence and reading difficulties at age seven. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 25(6), 783-793. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.1983.tb13847.x>
- Sireteanu, R., Goertz, R., Bachert, I. et Wandert, T. (2005). Children with developmental dyslexia show a left visual “minineglect”. *Vision Research*, 45(25-26), 3075-3082. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2005.07.030>
- Sirigu, A., Duhamel, J.-R., Cohen, L., Pillon, B., Dubois, B. et Agid, Y. (1996). The mental representation of hand movements after parietal cortex damage. *Science*, 273(5281), 1564-1568.
- Skoura, X., Vinter, A. et Papaxanthis, C. (2009). Mentally simulated motor actions in children. *Developmental Neuropsychology*, 34(3), 356-367.
- Smith, M. A. et Shadmehr, R. (2005). Intact ability to learn internal models of arm dynamics in Huntington’s disease but not cerebellar degeneration. *Journal of neurophysiology*, 93(5), 2809-2821.
- Spinelli, D., De Luca, M., Judica, A. et Zoccolotti, P. (2002). Crowding effects on word identification in developmental dyslexia. *Cortex*, 38(2), 179-200.
- Sprenger-Charolles et Colé. (2013a). *Lecture et dyslexie*. Dunod. <https://doi.org/10.3917/dunod.spren.2013.01>

- Sprenger-Charolles, L., Colé, P., Kipffer-Piquard, A., Pinton, F. et Billard, C. (2009). Reliability and prevalence of an atypical development of phonological skills in French-speaking dyslexics. *Reading and Writing*, 22(7), 811-842. <https://doi.org/10.1007/s11145-008-9117-y>
- Sprenger-Charolles, L., Colé, P., Lacert, P. et Serniclaes, W. (2000). On subtypes of developmental dyslexia: Evidence from processing time and accuracy scores. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue Canadienne de Psychologie Expérimentale*, 54(2), 87-104. <https://doi.org/10.1037/h0087332>
- Sprenger-Charolles, L., Siegel, L. S. et Bechenec, D. (1998). Phonological Mediation and Semantic and Orthographic Factors in Silent Reading in French. *Scientific Studies of Reading*, 2(1), 3-29. [https://doi.org/10.1207/s1532799xssr0201\\_1](https://doi.org/10.1207/s1532799xssr0201_1)
- Sprenger-Charolles, L., Siegel, L. S., Béchenec, D. et Serniclaes, W. (2003). Development of phonological and orthographic processing in reading aloud, in silent reading, and in spelling: A four-year longitudinal study. *Journal of Experimental Child Psychology*, 84(3), 194-217. [https://doi.org/10.1016/S0022-0965\(03\)00024-9](https://doi.org/10.1016/S0022-0965(03)00024-9)
- Sprenger-Charolles, L., Siegel, L. S., Jiménez, J. E. et Ziegler, J. C. (2011). Prevalence and Reliability of Phonological, Surface, and Mixed Profiles in Dyslexia: A Review of Studies Conducted in Languages Varying in Orthographic Depth. *Scientific Studies of Reading*, 15(6), 498-521. <https://doi.org/10.1080/10888438.2010.524463>
- Stanovich, Keith, Siegel, L. et Gottardo, A. (1997). Converging evidence of phonological and surface subtypes of reading disability. *Journal of Educational Psychology*, 89, 114-127. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.89.1.114>
- Stanovich, Keith. (1986). Matthew effects in reading: Some consequences of individual differences in the acquisition of literacy. *Reading Research Quarterly*, 48.
- Stanton-Chapman, T. L., Chapman, D. A., Bainbridge, N. L. et Scott, K. G. (2002). Identification of early risk factors for language impairment\$, 16.
- Stein, J. (2014). Dyslexia: the Role of Vision and Visual Attention. *Current Developmental Disorders Reports*, 1(4), 267-280. <https://doi.org/10.1007/s40474-014-0030-6>
- Stein, J. et Walsh, V. (1997). To see but not to read; the magnocellular theory of dyslexia. *Trends in neurosciences*, 20(4), 147-152.
- Stoodley, C. J. (2012). The cerebellum and cognition: evidence from functional imaging studies. *The Cerebellum*, 11(2), 352-365.
- Stoodley, C. J. (2016). The cerebellum and neurodevelopmental disorders. *The Cerebellum*, 15(1), 34-37.
- Stoodley, C. J., Fawcett, A. J., Nicolson, R. I. et Stein, J. F. (2005). Impaired balancing ability in dyslexic children. *Experimental brain research*, 167(3), 370-380.
- Stoodley, C., Ray, N., Jack, A. et Stein, J. (2008). Implicit learning in control, dyslexic, and garden-variety poor readers. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1145(1), 173.
- Stromswold, K. (2001). The Heritability of Language: A Review and Metaanalysis of Twin, Adoption, and Linkage Studies. *Language*, 77(4), 647-723. <https://doi.org/10.1353/lan.2001.0247>
- Studdert-Kennedy, M. (2002). Deficits in phoneme awareness do not arise from failures in rapid auditory processing. *Reading and Writing*, 15(1), 5-14.

- Tallal, P. (1980). Auditory temporal perception, phonics, and reading disabilities in children. *Brain and Language*, 9(2), 182-198. [https://doi.org/10.1016/0093-934X\(80\)90139-X](https://doi.org/10.1016/0093-934X(80)90139-X)
- Temple, C. M. et Marshall, J. C. (1983). A case study of developmental phonological dyslexia. *British Journal of Psychology*, 74(4), 517-533. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.1983.tb01883.x>
- Thonnard, J.-L., Saels, P., Van den Bergh, P. et Lejeune, T. (1999). Effects of chronic median nerve compression at the wrist on sensation and manual skills. *Experimental brain research*, 128(1-2), 61-64.
- Travis, K. E., Leitner, Y., Feldman, H. M. et Ben-Shachar, M. (2015). Cerebellar white matter pathways are associated with reading skills in children and adolescents. *Human brain mapping*, 36(4), 1536-1553.
- Undheim, A. M. (2009). A thirteen-year follow-up study of young Norwegian adults with dyslexia in childhood: reading development and educational levels. *Dyslexia*, 15(4), 291-303. <https://doi.org/10.1002/dys.384>
- Vaivre-Douret, L. (2008). Le point sur la dyspraxie développementale : symptomatologie et prise en charge. *Contraste*, N° 28-29(1), 321-341.
- Vaivre-Douret, L. (2014). Developmental coordination disorders: state of art. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*, 44(1), 13-23.
- Valdois, S., Bosse, M.-L., Ans, B., Carbonnel, S., Zorman, M., David, D. et Pellat, J. (2003). Phonological and visual processing deficits can dissociate in developmental dyslexia: Evidence from two case studies. *An Interdisciplinary Journal*, 16(6), 65.
- Valdois, S., Lassus-Sangosse, D. et Lobier, M. (2012). Impaired letter-string processing in developmental dyslexia: What visual-to-phonology code mapping disorder? *Dyslexia*, 18(2), 77-93.
- Valera, FJ., Thomson, E. et Rosch, E. (1991). *The embodied mind: Cognitive Science and human experience*.
- Vargas, C. D., Olivier, E., Craighero, L., Fadiga, L., Duhamel, J. R. et Sirigu, A. (2004). The influence of hand posture on corticospinal excitability during motor imagery: a transcranial magnetic stimulation study. *Cerebral cortex*, 14(11), 1200-1206.
- Vidyasagar, T. R. et Pammer, K. (2010). Dyslexia: a deficit in visuo-spatial attention, not in phonological processing. *Trends in cognitive sciences*, 14(2), 57-63.
- Vogler, G. P., DeFries, J. C. et Decker, S. N. (1985). Family History as an Indicator of Risk for Reading Disability. *Journal of Learning Disabilities*, 18(7), 419-421. <https://doi.org/10.1177/002221948501800711>
- Wang, Y., Paramasivam, M., Thomas, A., Bai, J., Kaminen-Ahola, N., Kere, J., Voskuil, J., Rosen, G. D., Galaburda, A. M. et Loturco, J. J. (2006). DYX1C1 functions in neuronal migration in developing neocortex. *Neuroscience*, 143(2), 515-522. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2006.08.022>
- Watier, L., Dellatolas, G. et Chevrie-Muller, C. (2006). Difficultés de langage et de comportement à 3 ans et demi et retard en lecture au cours élémentaire. *Revue d'Épidémiologie et de Santé Publique*, 54(4), 327-339. [https://doi.org/10.1016/S0398-7620\(06\)76728-1](https://doi.org/10.1016/S0398-7620(06)76728-1)

- White, S., Milne, E., Rosen, S., Hansen, P., Swettenham, J., Frith, U. et Ramus, F. (2006). The role of sensorimotor impairments in dyslexia: a multiple case study of dyslexic children. *Developmental Science*, 9(3), 237-255. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2006.00483.x>
- Wicker, B., Keysers, C., Plailly, J., Royet, J.-P., Gallese, V. et Rizzolatti, G. (2003). Both of us disgusted in My insula: the common neural basis of seeing and feeling disgust. *Neuron*, 40(3), 655-664.
- Willcutt, E. G. et Pennington, B. F. (2000). Comorbidity of Reading Disability and Attention-Deficit/ Hyperactivity Disorder: Differences by Gender and Subtype. *Journal of Learning Disabilities*, 33(2), 179-191. <https://doi.org/10.1177/002221940003300206>
- Williams, J. D., Rippon, G., Stone, B. M. et Annett, J. (1995). Psychophysiological correlates of dynamic imagery. *British Journal of Psychology*, 86(2), 283-300.
- Wilson, P. H., Smits-Engelsman, B., Caeyenberghs, K., Steenbergen, B., Sugden, D., Clark, J., Mumford, N. et Blank, R. (2017). Cognitive and neuroimaging findings in developmental coordination disorder: new insights from a systematic review of recent research. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 59(11), 1117-1129.
- Wolpert, D. M. et Ghahramani, Z. (2000). Computational principles of movement neuroscience. *Nature neuroscience*, 3(11), 1212-1217.
- Woollams, A. M., Ralph, M. A. L., Plaut, D. C. et Patterson, K. (2007). SD-squared: On the association between semantic dementia and surface dyslexia. *Psychological Review*, 114(2), 316-339. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.114.2.316>
- Ziegler, J. C., Castel, C., Pech-Georgel, C., George, F., Alario, F.-X. et Perry, C. (2008). Developmental dyslexia and the dual route model of reading: Simulating individual differences and subtypes. *Cognition*, 107(1), 151-178. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2007.09.004>
- Zorman, M., Lequette, C. et Pouget, G. (2004). Dyslexies: intérêt d'un dépistage et d'une prise en charge précoce à l'école, 28.

## ANNEXES

### Annexe 1 : feuilles de recueil de données du protocole de chronométrie mentale

DATE :
NOM :
Prénom :
Classe :
Age :
Droitier / Gaucher :



				ordre
<b>LOCOMOTION 1 :</b>				
Essai	Condition	Vision	DUREE	
_ loco_01	Réalisé	YO		
_ loco_02	Imaginé	YF		
_ loco_03	Réalisé	YO		
_ loco_04	Imaginé	YF		
_ loco_05	Réalisé	YO		
_ loco_06	Imaginé	YF		
_ loco_07	Réalisé	YO		
_ loco_08	Imaginé	YF		
_ loco_09	Réalisé	YO		
_ loco_10	Imaginé	YF		

				ordre
<b>POINTAGE SUR CIBLE :</b>				
Essai	Condition	Vision	DUREE	
_ loco_01	Réalisé	YO		
_ loco_02	Imaginé	YF		
_ loco_03	Réalisé	YO		
_ loco_04	Imaginé	YF		
_ loco_05	Réalisé	YO		
_ loco_06	Imaginé	YF		
_ loco_07	Réalisé	YO		
_ loco_08	Imaginé	YF		
_ loco_09	Réalisé	YO		
_ loco_10	Imaginé	YF		

				ordre 1
<b>MARCHE TENDEM :</b>				
Essai	Condition	Vision	DUREE	
_ loco_01	Réalisé	YO		
_ loco_02	Imaginé	YF		
_ loco_03	Réalisé	YO		
_ loco_04	Imaginé	YF		
_ loco_05	Réalisé	YO		
_ loco_06	Imaginé	YF		
_ loco_07	Réalisé	YO		
_ loco_08	Imaginé	YF		
_ loco_09	Réalisé	YO		
_ loco_10	Imaginé	YF		

REMARQUE :

DATE :
NOM :
Prénom:
Groupe:
DN :
Age :
CODE:

ordre 4			
ASSIS-DEBOUT			
Essai	Condition	Vision	DUREE
ADA 01	Réalisé	YO	
ADA 02	Imaginé	YF	
ADA 03	Réalisé	YO	
ADA 04	Imaginé	YF	
ADA 05	Réalisé	YO	
ADA 06	Imaginé	YF	
ADA 07	Réalisé	YO	
ADA 08	Imaginé	YF	
ADA 09	Réalisé	YO	
ADA 10	Imaginé	YF	

ordre			
LECTURE A VOIX HAUTE :			
Essai	Condition	Vision	DUREE
READ 01	Réalisé	YO	
READ 02	Imaginé	YF	
READ 03	Réalisé	YO	
READ 04	Imaginé	YF	
READ 05	Réalisé	YO	
READ 06	Imaginé	YF	
READ 07	Réalisé	YO	
READ 08	Imaginé	YF	
READ 09	Réalisé	YO	
READ 10	Imaginé	YF	

ordre			
ECRITURE			
Essai	Condition	Vision	DUREE
WRIT 01	Réalisé	YO	
WRIT 02	Imaginé	YF	
WRIT 03	Réalisé	YO	
WRIT 04	Imaginé	YF	
WRIT 05	Réalisé	YO	
WRIT 06	Imaginé	YF	
WRIT 07	Réalisé	YO	
WRIT 08	Imaginé	YF	
WRIT 09	Réalisé	YO	
WRIT 10	Imaginé	YF	

ordre			
LECTURE SILENCIEUSE :			
Essai	Condition	Vision	DUREE
-READ 11	Réalisé	YO	
-READ 12	Imaginé	YF	
-READ 13	Réalisé	YO	
-READ 14	Imaginé	YF	
-READ 15	Réalisé	YO	
-READ 16	Imaginé	YF	
-READ 17	Réalisé	YO	
-READ 18	Imaginé	YF	
-READ 19	Réalisé	YO	
-READ 20	Imaginé	YF	

ordre			
REPETER UNE PHRASE 1 :			
Essai	Condition	Vision	DUREE
REPE 01	Réalisé	YO	
REPE 02	Imaginé	YF	
REPE 03	Réalisé	YO	
REPE 04	Imaginé	YF	
REPE 05	Réalisé	YO	
REPE 06	Imaginé	YF	
REPE 07	Réalisé	YO	
REPE 08	Imaginé	YF	
REPE 09	Réalisé	YO	
REPE 10	Imaginé	YF	

Annexe 2 : feuille de passation pour la tâche d'écriture du protocole de chronométrie mentale

- *Il fait très beau en été*  
\_\_\_\_\_
  
- \_\_\_\_\_
  
- \_\_\_\_\_
  
- \_\_\_\_\_
  
- \_\_\_\_\_
  
- \_\_\_\_\_

Annexe 3 : feuilles de lecture à voix haute à gauche et feuilles de lectures silencieuses à droite du protocole de chronométrie mentale

Le chat miaule, il hérissé les poils de son dos et grimpe alors tout en haut du meuble.

Le poussin donne des coups de bec pour faire un trou et sortir de son œuf.

Donne du foin au cheval et ensuite met une pierre devant la porte pour pas qu'elle se referme.

Rien de bien méchant, c'est juste pour vérifier que vous avez bien lu ce que j'ai écrit et voir ce que vous avez retenu.

Loin de la ville et de son bruit, les oiseaux et les cigales chantent toute la journée.

Le chat grimpe tout en haut du meuble alors qu'il miaule et hérissé les poils de son dos.

Pour faire un trou et sortir de l'œuf, le poussin donne des coups de bec.

Pour pas que la porte se referme, met une pierre devant et donne ensuite du foin au cheval.

Ce n'est pas méchant, c'est juste pour vérifier que vous avez bien lu et retenu ce que j'ai écrit.

Toute la journée les oiseaux et les cigales chantent loin du bruit de la ville.

Annexe 4 : questionnaire de ressentis du protocole de chronométrie mentale

**Questionnaire de ressenti après passation du protocole d'imagerie motrice**

A partir de l'échelle ci-dessous, indiquez la difficulté ressentie pendant les tâches imaginées :

-3	-2	-1	0	1	2	3
Très difficile	Difficile	Assez difficile	Neutre	Assez facile	Facile	Très facile

- Marche vers une cible :
- Marche en tandem :
- Pointage locomoteur :
- Assis/debout :
- Ecriture d'une phrase :
- Répétition d'une phrase :
- Lecture à voix haute :
- Lecture silencieuse :

Avant cette expérience, avais-tu déjà imaginé des actions ?  oui  non

Si oui : quelles actions imagines-tu ?

Des actions que tu sais parfaitement faire ?  oui  non

Des actions que tu es en train d'apprendre ?  oui  non

Des leçons que tu te récites dans ta tête ?  oui  non

As-tu trouvé cette méthode tout(e) seul(e) ?  oui  non

Est-ce que tu trouves que cette méthode te permet de mieux apprendre ?  oui  non

Est-ce que tu l'utilises souvent ?  oui  non

Remarques autres :

## Questionnaire sur votre enfant

### ❖Quelques repères sur le développement sensorimoteur :

***Votre enfant a-t-il des difficultés pour :***

- Tenir en équilibre sur un pied :  Oui  Non
- Faire du vélo, trottinette ou roller :  Oui  Non
- Nager :  Oui  Non
- Sauter à la corde :  Oui  Non
- Lacer ses chaussures :  Oui  Non
- Boutonner correctement ses habits :  Oui  Non

### ❖Quelques informations de santé :

***Votre enfant présente-t-il d'autres troubles associés à sa dyslexie :***  Oui  Non

***Si oui lesquels :***

- Dyspraxie :
- Troubles de l'attention :
- Autres :

***Est-il pris en soin par d'autres professionnels de santé ?***

- Orthophoniste :  Oui  Non
- Psychologue :  Oui  Non
- Psychomotricien :  Oui  Non
- Autres :

### ❖Quelques repères des activités de la vie quotidienne :

***Activités sportives (expliquez si scolaire) :***  Oui  Non

Nombre d'heures par semaine :

***Activités artistiques :***  Oui  Non

Nombre d'heures par semaine :

***Activités multimédia (TV, ordinateur, cinéma... hors jeux vidéos) :***  Oui  Non

Nombre d'heures par jour :

Nombre d'heures par semaine :

***Pratique de jeux vidéo (consoles) :***  Oui  Non

Si oui la pratique est :  Occasionnelle (1 fois par semaine)

Régulière (Plusieurs fois par semaine)

Intensive (tous les jours)



**Formulaire du recueil de consentement à destination des enfants dyslexiques**

**Exploration des représentations sensorimotrices chez l'enfant dyslexique**

Christine Assaiante, Directrice de recherche au laboratoire de neurosciences cognitives / CNRS Marseille a proposé à mon enfant (ou la personne dont je suis le responsable légal) de participer à la recherche impliquant la personne humaine intitulée « Exploration des représentations sensorimotrices chez l'enfant dyslexique » dans les conditions présentées ci-dessous.

Mon enfant (ou la personne dont je suis responsable légal) et moi avons pris connaissance de la notice d'information sur cette recherche. Nous avons pu poser toutes les questions souhaitées et nous avons reçu des réponses pertinentes.

Nous avons noté que toutes les informations nous concernant et les données recueillies lors de cette recherche resteront strictement confidentielles. Elles ne pourront être consultées que par les personnes référencées dans cette recherche à savoir : Mme Assaiante Christine, Desbordes Clémence, et Bordier Héloïse.

Nous acceptons les traitements des données personnelles et médicales qui nous concernent en conformité avec les dispositions de la loi n°78-17 du 6 janvier 1978 modifiée relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés et du règlement européen n°2016/679 sur la protection des données. Le responsable de traitement est Mme Assaiante C. Je pourrai à tout moment demander des informations à Mme Assaiante et exercer auprès d'elle notre droit d'accès, de rectification, d'opposition et d'effacement ainsi que nos droits de demander la limitation de l'usage des données de mon enfant.

En cas de retrait de ce consentement et/ou d'exercice du droit à l'effacement de nos données, nous avons été informés que ce retrait n'a pas d'incidence sur les activités menées et sur l'utilisation des données obtenues sur la base du consentement éclairé exprimé avant que celui-ci n'ait été retiré. Nous consentons à ce que les données antérieurement collectées puissent être conservées et utilisées dans le cadre de la présente recherche. La publication des résultats de la recherche ne comportera aucun résultat individuel identifiant.

Nous avons compris que nous pouvions refuser de participer à cette étude sans conséquences pour nous, et que nous pourrions retirer notre consentement à tout moment sans avoir à nous justifier et sans conséquence.

**Compte tenu des informations qui nous ont été transmises, nous acceptons librement et volontairement de participer à la recherche biomédicale intitulée « Exploration des représentations sensorimotrices chez l'enfant dyslexique ».**

Fait à Marseille le .....

**Signature précédée de la mention « lu et approuvé »**

## Annexe 7 : Informations à destination des parents

### **Lettre d'information aux parents sur l'exploration des représentations sensorimotrices chez l'enfant dyslexique**

Nous sommes deux étudiantes en 5<sup>ème</sup> année d'orthophonie à la Faculté de Médecine de Marseille. Dans le cadre de notre mémoire de fin d'étude, nous nous intéressons à l'étude des représentations sensorimotrices chez l'enfant dyslexique, en collaboration avec Christine Assaiante, Directrice de Recherche au CNRS, au Laboratoire de Neurosciences Cognitives (LNC) à Marseille. Pour cette raison, nous sommes à la recherche d'enfants dyslexiques âgés de 8 à 11 ans afin d'explorer leurs capacités sensorimotrices.

#### **Que signifient les représentations sensorimotrices ?**

Les représentations sensorimotrices correspondent à la représentation que vous vous faites de votre propre corps dans votre cerveau. On les utilise inconsciemment dans tous nos actes de la vie quotidienne et pour nos apprentissages. Par exemple, lorsque vous marchez, vous êtes conscient du mouvement de vos jambes, ce qui vous permet d'adapter votre marche aisément sans pour autant les regarder. Ces représentations se modifient constamment lors de nos interactions avec notre environnement. Cela permet d'adapter au mieux nos mouvements.

#### **Quel est le lien avec la dyslexie ?**

Actuellement, la littérature scientifique s'accorde sur le fait que la dyslexie serait causée par un trouble phonologique c'est-à-dire une altération de la représentation des sons de la parole. Mais certains auteurs suggèrent que le trouble de la lecture ne serait que la partie visible de « l'iceberg » et que la dyslexie serait la conséquence d'un déficit plus général et qui ne serait pas spécifique au langage. Ainsi, cette expérience a pour but d'étudier les relations entre les représentations sensorimotrices et la dyslexie.

#### **En quoi consiste la passation ?**

- La passation consiste en une série de tests sensorimoteurs
- La passation de votre enfant se déroulera en deux phases qui dureront chacune entre 30 et 40 minutes. Pour éviter que cela soit trop long pour votre enfant, cette passation se fera sur deux jours distincts.
- Dans l'une des phases, nous demanderons à votre enfant d'effectuer des activités ludiques mettant en jeu sa dextérité et son équilibre.
- Dans l'autre phase, votre enfant aura également à effectuer des actions de la vie quotidienne puis à s'imaginer en train de reproduire ces mêmes actions (marcher, lire...) tout en se chronométrant.
- Cette étude se déroulera dans une atmosphère bienveillante, nous veillerons à ce que votre enfant se sente en confiance.
- A la fin de la passation, nous questionnerons votre enfant sur ses ressentis.
- Au préalable, vous signerez un consentement pour que votre enfant puisse participer à la passation, avec son plein accord.

#### **Où se déroule la passation ?**

Afin que votre enfant se sente à l'aise et dans un milieu avec lequel il est familier, l'idéal serait que la passation se fasse à votre domicile. Nous pourrions nous adapter à vos disponibilités (journée, soirée, week-end).

Le lieu de passation ne doit pas être un obstacle à la participation de votre enfant, nous vous proposerons un autre lieu si la passation n'est pas envisageable à domicile.

Mesures sanitaires : port du masque, désinfection de mains et aération de la pièce

**Nous serions ravies d'échanger avec vous et votre enfant autour du sujet.**

## Lettre à destination de l'orthophoniste

Dans le cadre de notre mémoire de fin d'étude, nous nous intéressons aux représentations sensorimotrices chez le jeune enfant dyslexique, en collaboration avec Christine Assaiante, Directrice de Recherche au CNRS, au Laboratoire de Neurosciences Cognitives (LNC). Nous sommes à la recherche d'une population d'enfants de **8 ans à 11 ans** (ou scolarisés du **CE2 au CM2**), ayant fait l'objet d'un diagnostic de **dyslexie et pris en charge** en orthophonie.

Les sujets ne doivent présenter ni de déficit sensoriel non corrigé ni de déficit intellectuel.

Dans une atmosphère bienveillante et ludique, nous proposerons aux sujets deux tests d'environ 30 minutes chacun :

- Le test de **M-ABC** afin d'évaluer leurs capacités motrices (dextérité manuelle, équilibre...)
- Un **protocole de chronométrie mentale** permettant d'étudier la qualité de leurs représentations sensorimotrices. Les enfants seront amenés à effectuer des actions de la vie quotidienne puis à s'imaginer en train de reproduire ces mêmes actions (marcher, se lever, écrire, lire à voix haute, lire silencieusement...) tout en se chronométrant. A la fin de la passation, nous questionnerons l'enfant sur ses ressentis.

Les passations se feront, dans l'idéal, au domicile de l'enfant. Nous nous adapterons aux disponibilités des familles (journée, soirée, week-end). *Dans la mesure où la passation ne pourrait se dérouler chez l'enfant, nous serons amenés à rechercher un autre lieu. Si vous êtes en mesure de nous mettre à disposition une salle de manière ponctuelle, n'hésitez pas à nous en informer.*

Mesures sanitaires : port du masque, désinfection de mains et aération de la pièce

**Si, au sein de votre patientèle, vous avez des enfants qui pourraient correspondre aux critères, nous avons rédigé une lettre d'information que vous pouvez adresser aux parents.**

### Que signifient les représentations sensorimotrices ?

Les représentations sensorimotrices correspondent à la représentation que vous vous faites de votre propre corps dans votre cerveau. On les utilise inconsciemment dans tous nos actes de la vie quotidienne et pour nos apprentissages. Par exemple, lorsque vous marchez, vous êtes conscient du mouvement de vos jambes, ce qui vous permet d'adapter votre marche aisément sans pour autant les regarder. Ces représentations se modifient constamment lors de nos interactions avec notre environnement. Cela permet d'adapter au mieux nos mouvements.

### Quel est le lien avec la dyslexie ?

Actuellement, la littérature scientifique s'accorde sur le fait que la dyslexie serait causée par un trouble phonologique c'est-à-dire une altération de la représentation des sons de la parole. Mais certains auteurs suggèrent que le trouble de la lecture ne serait que la partie visible de « l'iceberg » et que la dyslexie serait la conséquence d'un déficit plus général et qui ne serait pas spécifique au langage. Ainsi, cette expérience a pour but d'étudier les relations entre les représentations sensorimotrices et la dyslexie.

Merci beaucoup,

Cordialement,

## **ABSTRACT**

La capacité d'un sujet à percevoir et interagir avec le milieu dans lequel il évolue fait appel à des représentations internes des schémas d'actions et des contraintes environnementales. Ces représentations sensorimotrices sont mises en jeu lors du couplage perception-action, qui constitue le socle de toute acquisition. Une altération de ces représentations pourrait entraver le bon développement des apprentissages (Assaiante et al., 2014). En l'état actuel de la recherche, le trouble phonologique apparaît comme cause principale de la dyslexie. Cependant, certains chercheurs émettent l'hypothèse que ce trouble de lecture serait la conséquence d'un déficit plus général (Nicolson et al., 2001). En effet, la comorbidité observée au sein des pathologies neurodéveloppementales semble représenter la règle plutôt que l'exception (Kaplan et al., 1998). Notre étude a pour but d'explorer les représentations sensorimotrices chez les enfants dyslexiques en s'intéressant à la question suivante : est-ce que l'atteinte des troubles phonologiques chez l'enfant dyslexique est associée à une atteinte plus générale des représentations sensorimotrices ? Pour cela, nous avons utilisé un protocole de chronométrie mentale permettant d'explorer la qualité de ces représentations à travers des épreuves d'imagerie motrice. Les durées d'exécution, ainsi que les indices d'isochronie récoltés lors des épreuves chez 10 enfants dyslexiques ont été comparés à ceux de 10 enfants normolecteurs âgés de 8 à 11 ans. Une comparaison avec des adultes normolecteurs et dyslexiques a également été faite. Par ailleurs, une évaluation de la motricité fine et globale chez certains enfants dyslexiques a été effectuée par le biais de la batterie MABC-2. Malgré le faible effectif de l'étude, nos résultats mettent en évidence un effet développemental sur les compétences d'imagerie motrice, les durées et les variabilités d'exécution. Un possible effet de la dyslexie a été retrouvé, mais il devra être confirmé par de futures études avec davantage de sujets.

**Mots-clés** : orthophonie ; enfants dyslexiques ; représentations sensorimotrices ; chronométrie mentale

The ability of a subject to perceive and interact with the environment in which he evolves involves internal representations of action patterns and environmental constraints. These sensorimotor representations are engaged during the perception-action coupling, which constitutes the basis of all acquisitions. An alteration of these representations could therefore hinder the proper development of learning (Assaiante et al., 2014). In the current state of research, phonological impairment appears to be the main cause of dyslexia. However, some researchers hypothesize that this reading disorder is the consequence of a more general deficit (Nicolson et al., 2001). Indeed, comorbidity within neurodevelopmental disorders is frequently observed (Kaplan et al., 1998). The purpose of our study is to explore the sensorimotor representations in dyslexic children by focusing on the following question : Is the phonological impairment in dyslexic children associated with a more general impairment of sensorimotor representations ? For this purpose, we used a mental chronometry protocol to explore the quality of these representations through motor imagery tests. Execution times and isochrony indices collected during the tests on 10 dyslexic children were compared to 10 average readers aged 8 to 11 years. Moreover, comparisons with dyslexic adults was made. In addition, a fine and gross motor assessment of some dyslexic children was proposed using the MABC-2 battery. Despite the small sample of this study, our results show a developmental effect on motor imagery skills as well as on duration and variability of execution. A possible effect of dyslexia was also found, but it must be confirmed by future studies with larger numbers.

**Keywords** : speech therapy ; dyslexic children ; sensorimotor representations ; mental chronometry