

Titre : Effet de la comorbidité sensorimotrice dans la dyslexie
développementale : entre déficit phonologique et atteinte des représentations
internes de l'action

Title: Effect of sensorimotor comorbidity in developmental dyslexia: between
phonological deficit and impairment of internal representations of action

Rebecca Marchetti^{a,b,c}, Marianne Vaugoyeau^{a,c}, Pascale Colé^{b,c}, Christine Assaiante^{a,c}

a Aix-Marseille Univ, CNRS, LNC UMR 7291, Marseille, France

b Aix-Marseille Univ, LPC UMR 7290, Marseille, France

c Aix Marseille Univ, CNRS, Fédération 3C, Marseille, France

Auteur de correspondance :

Rebecca Marchetti

Laboratoire de Neurosciences Cognitives, UMR 7291, et Laboratoire de Psychologie Cognitive
(UMR 7290) CNRS-AMU

Centre Saint-Charles, 3 place Victor Hugo 13331 Marseille cedex 3, FRANCE

rebecca.marchetti@univ-amu.fr

RESUME :

Sur la base de l'existence de troubles sensorimoteurs, fréquemment rapportés dans la littérature chez l'enfant et l'adulte dyslexique (Nicolson et Fawcett., 1999 ; Ramus et al., 2003a, Cignetti et al., 2018), cet article s'intéresse au lien entre déficit phonologique sous-jacent et syndrome sensorimoteur, ou plus précisément entre atteinte phonémique et atteinte des représentations internes de l'action. Pour tenter de répondre à cette question, nous alimenterons le débat par les résultats récents de deux études dans lesquelles nous avons testé une cinquantaine d'étudiants dyslexiques, appariés à des normo-lecteurs, engagés dans deux protocoles d'idéation motrice et de conscience phonémique. Ces premiers résultats effectués sur une large population mettent ainsi en avant l'importance de la comorbidité du syndrome sensorimoteur à travers une altération des représentations internes de l'action et de la conscience phonémique spécifique au sous-groupe de jeunes adultes dyslexiques comorbides. Ainsi, l'atteinte sensorimotrice ne semble pas directement impacter les troubles en lecture des jeunes adultes, mais plutôt refléter des profils dyslexiques différents. Ces résultats soutiennent donc l'existence d'un profil sensorimoteur qui persiste chez les dyslexiques adultes et s'avèrent aussi être un argument de plus en faveur de la présence d'un déficit multiple associé à la dyslexie.

ABSTRACT :

Based on the existence of sensorimotor disorders frequently reported in children and adults with dyslexia (Nicolson and Fawcett, 1999; Ramus et al., 2003a, Cignetti et al., 2018), this paper focuses on the link between the underlying phonological deficit and a sensorimotor syndrome, or more precisely, between phonemic representation impairment and impairment of internal representations of action. To address this question, we will contribute to the debate with the recent results of two studies in which we tested about fifty dyslexic students, matched with normo-readers, in two protocols of motor ideation and phonemic awareness. These first results, conducted on a large population, highlight the importance of the comorbidity of the sensorimotor syndrome through an alteration of the internal representations of action and phonemic awareness specific to a subgroup of dyslexic young adults with sensorimotor comorbidity. Thus, sensorimotor impairment does not seem to directly impact on young adults' reading difficulties, but rather reflects different dyslexic profiles. These results therefore support the existence of a sensorimotor profile that persists in adult dyslexics and also provide further support for the presence of a multiple deficit associated with dyslexia.

MOTS CLES :

Jeune adulte dyslexique, Phonologie, Comorbidité sensorimotrice, Représentations phonémiques, Représentations internes de l'action

KEY WORDS:

Young dyslexic adult, Phonology, Sensorimotor comorbidity, Phonemic representations, Internal action representations

INTRODUCTION :

La dyslexie développementale (par la suite dyslexie) est un trouble neurodéveloppemental spécifique des apprentissages, qui affecte environ 6 à 8% de la population française (rapport de l'INSERM, 2007). La dyslexie se caractérise par des difficultés importantes de lecture, d'orthographe et de décodage (par exemple, lenteur et imprécision), qui ne peuvent être expliquées par un enseignement inadéquat, des difficultés psychosociales ou des troubles neurologiques interférant de manière significative avec la réussite scolaire (APA, 2013). Les troubles de la lecture persistent à l'âge adulte (Ramus et al., 2003a ; Cavalli et al., 2017 ; Cavalli et al., 2018). Des études rapportent également l'impact de la dyslexie dans la vie quotidienne avec des expériences émotionnelles négatives notamment sur l'estime de soi et l'efficacité personnelle qui se manifestent dans le milieu académique (à l'université) et dans la vie professionnelle (Carroll & Iles, 2006 ; Beer et al., 2014 ; Nalavany et al., 2017). La dyslexie constitue ainsi un véritable handicap cognitif, qui à l'âge adulte peut également constituer d'un handicap social (Colé & Sprenger-Charolles, 2021, Glazzard 2010, Haft et al., 2016).

Plusieurs hypothèses sur les origines de la dyslexie ont été formulées parmi lesquelles l'hypothèse d'un déficit phonologique (la plus largement admise et sur laquelle nous reviendrons : Snowling & Frith, 2000 ; Vellutino & Fletcher, 2004 ; Shaywitz & Shaywitz, 2005 ; Ramus & Szenkovitz 2008), l'hypothèse de déficits auditifs (Tallal & Piercy, 1973 ; Tallal., al., 1980), l'hypothèse de déficits visuels (Kapoula, Gaertner & Matheron, 2012 ; Quercia, Demougeot, Dos Santos & Bonnetblanc, 2011), et l'hypothèse de troubles cérébelleux ou sensorimoteurs (voir Colé & Sprenger-Charolles 2021 pour une revue, Nicolson et al., 2001 et 2011, Stoodley & Stein 2011 et 2013). Ces hypothèses envisagent les origines de la dyslexie comme mono-factorielles. Toutefois, Pennington (2006) a remis en question le modèle de déficit unique de la dyslexie en soulignant qu'il ne permettait pas de rendre compte des comorbidités de la dyslexie avec d'autres troubles du développement, ceux le plus souvent associés à la dyslexie étant la dyscalculie, les troubles spécifiques du langage oral (TSLO), les troubles de l'intelligibilité de la parole et ceux de l'attention avec ou sans hyperactivité (TDAH) (voir Colé & Sprenger-Charolles, 2021). Ainsi, par exemple, Willcutt & Pennington (2000) rapportent que la comorbidité de la dyslexie et des TDAH se situe entre 25 et 40%, suggérant que ces troubles n'apparaissent pas indépendamment les uns des autres.

ORIGINES DE LA DYSLEXIE : HYPOTHESES CONSENSUELLES ET APPORTS DE LA SENSORIMOTRICITE

Une origine phonologique

Le trouble phonologique (ou trouble du traitement des sons de parole) observé dans la population dyslexique semble être central dans la dyslexie par sa persistance à l'âge adulte (Cavalli et al., 2017 ; Cavalli et al., 2018 ; Ramus et al., 2003a ; Snowling & Frith, 2000 ; Vellutino & Fletcher, 2004 ; Shaywitz & Shaywitz, 2005 ; Ramus & Szenkovitz 2008). Ainsi, par exemple, 100% des participants adultes dyslexiques manifestent des troubles phonologiques dans l'étude de Ramus et al. (2003a) et dans l'étude Cavalli et al. (2017) lorsque les temps de réponse sont pris en considération. L'hypothèse d'une altération phonologique est

actuellement la plus consensuelle et la plus validée (Colé & Sprenger-Charolles, 2021). Les résultats de nombreuses études en neuroimagerie confortent cette hypothèse, en rapportant une diminution de la matière grise dans le sillon temporal supérieur (STS) gauche (Eckert et al., 2016), région considérée comme centrale pour le traitement phonologique (Hickok & Poeppel, 2007), et une sous-activation de cette région dans des tâches de lecture chez les participants dyslexiques (Blau et al., 2010).

De fait, depuis une quarantaine d'années, les travaux dans le champ de l'acquisition de la lecture montrent que l'efficacité des traitements phonologiques (phonologique : terme générique qui renvoie au traitement de différentes unités du langage oral tels que les syllabes, les rimes ou les phonèmes) et plus particulièrement phonémiques (traitement des phonèmes) est cruciale pour la réussite de cet apprentissage scolaire tout au moins dans un système d'écriture alphabétique qui code les phonèmes (les plus petites unités distinctives du langage oral., par exemple /lac/ est composé de 3 phonèmes) à l'aide de symboles visuels que sont les lettres. Ainsi, pour comprendre le principe alphabétique, l'enfant apprenti-lecteur doit développer une conscience phonémique des mots parlés, c'est-à-dire comprendre que les mots parlés sont composés de phonèmes et être capable de les manipuler consciemment (Liberman, Shankweiler & Liberman, 1989). Il peut alors apprendre les associations lettres-sons et les utiliser pour décoder les mots (c'est-à-dire traduire les lettres en leurs sons correspondants), les stocker en mémoire et ainsi activer le code phonologique du mot lu (soit l'identité des phonèmes du mot et leur combinaison) qui permet de lire à haute voix. L'apprentissage de la lecture dans un système alphabétique nécessite donc l'établissement d'une correspondance étroite entre les lettres et les sons de parole. Un déficit de représentation, de stockage ou d'accès à ces sons de parole a donc un impact important sur les différents traitements phonologiques nécessaires pour apprendre à lire et sur le processus de lecture (Vellutino, 1979 ; Snowling, 1981 ; Castles et al., 2018). Les représentations phonologiques font référence à la représentation ou au stockage abstrait dans le cerveau, d'unités de la parole, distinctes de la reconnaissance et de la production de mots. Des performances déficitaires dans différentes tâches impliquant des traitements phonologiques différents ont ainsi été observées chez les individus dyslexiques, telles que dans des tâches de conscience phonémique (par exemple, supprimer le premier son d'un mot et dire ce qu'il reste), de mémoire verbale à court terme (répéter des séquences de syllabes de plus en plus longues) et de dénomination rapide (dénommer des lettres, des chiffres, et des images le plus rapidement possible ; Ramus et al., 2013). Néanmoins, la nature spécifique du déficit phonologique fait encore l'objet de débats. Pour certains chercheurs, des représentations phonémiques peu précises seraient à l'origine des troubles phonologiques de la dyslexie (Harm & Seidenberg, 1999 ; Goswami, 2000 ; Snowling & Frith, 2000) alors que pour d'autres, ces représentations seraient intactes mais leur accès (ou activation) serait très lent (Dickie et al., 2013 ; Mengisidou & Marshall, 2019 ; Ramus & Szenkovits, 2008 ; Ramus & Ahissar, 2012 ; Ramus, 2014 ; Soroli et al., 2010 ; Szenkovits et al., 2016 ; Boets et al., 2013).

Plus récemment, une étude en IRMf de Vandermosten et al. (2020) tend à valider l'hypothèse de déficits des représentations phonémiques chez de jeunes enfants à risque familial de développer une dyslexie, à l'inverse d'enfants sans risque. Cependant, aucune différence de groupe n'a été observée lorsque les enfants du groupe à risque familial ont été diagnostiqués, quelques mois ou années plus tard, comme dyslexiques versus normo lecteurs. Ce résultat suggère qu'un déficit des représentations phonémiques constitue un facteur de risque de développer une dyslexie, mais qu'il n'explique pas à lui seul la manifestation d'une dyslexie.

Comme nous l'avons souligné, ces deux hypothèses du déficit phonologique dans la dyslexie (déficit de représentation versus déficit d'accès) restent débattues (Ramus, 2014) et plusieurs études ont évalué la possibilité d'une atteinte sensorimotrice dans la dyslexie, ce qui permet

d'envisager une hypothèse alternative selon laquelle le déficit phonologique trouverait son origine dans un déficit plus général (Nicolson & Fawcett 2001 et 2011, Stoodley & Stein 2011 et 2013). De fait, des troubles sensorimoteurs, ont été rapportés chez les individus affectés d'une dyslexie et ce, affectant plus les enfants que les adultes (Iversen & al., 2005 ; Needle, Fawcett, & Nicolson, 2006 ; Pozzo et al., 2006 ; Vieira et al., 2009 ; Malek et al., 2013 ; Stoodley & Stein, 2013 ; Bucci et al., 2013a, 2013b ; Barela et al., 2014; Cignetti et al., 2018). Mais, les petites tailles des échantillons de ces études (souvent 12 et 20 participants) conduisent à se poser la question d'un véritable effet développemental révélant une décroissance des troubles avec l'âge ou plus simplement d'une sous-estimation des troubles sensorimoteurs, rarement testés, dans la population dyslexique adulte.

Actuellement, un consensus semble, cependant, émerger en faveur de l'existence de troubles sensorimoteurs dans la dyslexie, avec une prévalence plus faible chez les adultes que chez les enfants (Savage, 2004 ; Chaix et al., 2007), suggérant que la dyslexie serait caractérisée par un trouble spécifique phonologique parfois associé à un syndrome sensorimoteur.

Un cadre sensorimoteur pour étudier un déficit généralisé de représentation dans la dyslexie

L'existence de troubles posturaux, oculomoteurs, de coordination motrice et d'apprentissage moteur implicite rapportés chez les enfants et adultes dyslexiques sont des arguments forts en faveur de l'hypothèse sensorimotrice de la dyslexie (Nicolson et al., 1999 ; Cignetti et al., 2018). Néanmoins, l'existence d'atteintes de la sphère sensorimotrice dans la dyslexie reste encore aujourd'hui débattue. Par exemple, de nombreuses études ont mis en évidence l'existence de troubles du contrôle postural chez les enfants et les adultes dyslexiques (Nicolson & Fawcett, 1999 ; Barela et al., 2014), alors que d'autres rapportent le résultat inverse (Wimmer et al., 1999 ; Ramus, 2003a). La comorbidité entre la dyslexie et d'autres troubles neurodéveloppementaux tels que le trouble développemental de la coordination (TDC) pourrait expliquer les divergences rapportées dans la littérature (Cignetti et al., 2018).

Le TDC, encore couramment appelé dyspraxie, dyspraxie de développement ou encore trouble de l'acquisition de la coordination selon les disciplines mais aussi en fonction de l'évolution des connaissances scientifiques, fait encore en France l'objet de discussions sur les différentes terminologies et les atteintes qui y sont rattachées (voir l'expertise de l'INSERM, trouble développemental de la coordination ou dyspraxie, 2019). Cependant, il existe actuellement un consensus international, qui définit le TDC, ou *Developmental Coordination Disorder* (DCD) en anglais, comme un trouble moteur neurodéveloppemental présentant les caractéristiques suivantes ; maladresse, imprécision et lenteur motrice précoce interférant avec la vie quotidienne et non explicable par un trouble visuel, cognitif ou neurologique sous-jacent (APA, 2013; expertise de l'INSERM, trouble développemental de la coordination ou dyspraxie, 2019; Vaivre-Douret et al., 2021).

S'appuyant sur l'hypothèse que l'imagerie motrice (IM) permet d'accéder à des représentations internes de l'action (Decety & Grezes 1999 ; Sirigu et al. 1995), de nombreuses études en IM, dans des tâches de rotation mentales de la main, des tâches de pointage, des tâches d'estimation de distance ou encore de latéralité manuelle, ont montré une atteinte des représentations internes chez des enfants atteints de TDC (Adams et al. 2014, 2017 ; Assaiante, 2019 ; Deconinck et al ; 2009 ; Gabbard & Bobbio 2011 ; Wilson et al., 2013). De même, des études menées chez des adultes atteints de TDC, ont rapporté que le déficit d'IM pouvait persister au-delà de l'enfance et l'adolescence (Hyde et al., 2014). Ces résultats, couplés aux études sur le déficit du contrôle prédictif des mouvements oculaires, des ajustements posturaux anticipés, de la marche ou de la

rotation mentale dans la population TDC ont soutenu l'hypothèse du "déficit de modélisation interne".

Apport de la cognition incarnée au traitement de la parole

La cognition dite incarnée du système cognitif propose que le fonctionnement de l'esprit humain ne peut être dissocié du corps qui l'abrite et dans lequel il « s'incarne » (Varela, 1991). La cognition engage donc tout le corps de l'individu qui permet une interaction fusionnelle continue avec le milieu dans lequel il se trouve. Ainsi, dans toute activité cognitive, le système cognitif traite toutes les informations qu'il reçoit du monde extérieur que celles-ci soient visuelles, auditives et plus généralement sensorimotrices. Ainsi, par exemple, reconnaître un mot écrit, consiste à simuler dans le cerveau toutes les propriétés du concept auquel renvoie le mot que l'on lit.

Dans le domaine du langage oral, les résultats d'études de neuroimagerie appuient cette conception incarnée en observant que les aires cérébrales impliquées dans la perception et l'identification des phonèmes sont les mêmes que celles impliquées dans la production de ces phonèmes. Plus précisément, l'étude de Pullvermüller et al., (2006) montre que l'identification de phonèmes dans une syllabe parlée active automatiquement les régions motrices qui correspondent aux gestes articulatoires associés à ces phonèmes. Ces régions motrices « simuleraient » ces gestes articulatoires. Cette activation du système moteur orofacial lors de la perception de la parole indique une connexion forte entre les systèmes de production et de perception de la parole (et donc plus généralement entre la perception et l'action). Pour un certain nombre de modèles (Schwartz et al., 2012 ; Skipper et al., 2007), la simulation motrice des gestes articulatoires aide à la perception des sons de parole en réduisant les interprétations possibles de l'information sensorielle (ici acoustique) traitée par le système cognitif.

Ainsi, les modèles de perception et de production de la parole proposent que les phonèmes seraient traités dans des espaces multidimensionnels moteurs et sensoriels, ce que valident de nombreuses études physiologiques et de neuro-imagerie (Boulenger et al., 2009 ; Repetto et al., 2013 ; Dalla Volta et al., 2014 ; voir Pulvermüller 2005, Borghi 2010, Galetzka 2017 pour une revue). Ces études et ces modèles suggèrent également que la communication verbale reposerait sur un principe de parité entre la personne qui parle (production) et celle qui écoute (perception), à l'aide de représentations phonémiques communes et partagées.

Rôle central du couplage perception-action

Les modèles exposés ci-dessus plaident en faveur d'un couplage fonctionnel entre l'action de production de la parole et les systèmes de perception dans le cerveau du locuteur et de l'auditeur, les unités phonémiques étant partiellement entraînées par la simulation interne du moteur vers le sensoriel (action) et du sensoriel vers le moteur (perception). De fait, depuis la naissance, le couplage perception-action assure la communication permanente et réciproque entre l'individu et son environnement. Dans ce cadre, il semble important de s'interroger sur la qualité de ce couplage perception-action, encore non exploré, chez les adultes dyslexiques. Ce lien fonctionnel perception-action, basé sur une interaction réciproque entre l'action observée et l'action exécutée, sous-tendu par le système des neurones miroirs, neurones mis en évidence il y a une vingtaine d'années premièrement chez le singe puis chez l'Homme (Di Pellegrino et al., 1992 ; Gallese et al., 1996 ; Rizzolatti et al., 1988 ; 2001 ; 2002), est d'ailleurs proposé comme constituant la base du développement des représentations sensorimotrices, cognitives et sociales (Assaiante et al., 2014 ; Assaiante, 2020). Plusieurs arguments soutiennent cette

hypothèse, comme la co-structuration des systèmes sensoriels et moteurs durant la première année de vie, le recrutement du système moteur et le rôle potentiel des neurones miroirs dans la perception de la parole (voir Grabski & Sato, 2020). En effet, la perception d'une action identique ou similaire à celle exécutée induirait des réponses motrices plus rapides (Brass et al., 2001), ce qui refléterait un effet de facilitation dans la planification de l'action (Craighero et al., 2002). De la même façon, il a été démontré chez l'adulte dans une étude de neuroimagerie que l'expérience motrice influence la force du couplage perception-action (Calvo-Merino et al., 2006). A l'inverse, l'exécution d'une action incongrue, tel que le mouvement d'un doigt dans une direction opposée à une vidéo proposé simultanément au sujet, affecterait le couplage perception-action (Brass et al., 2001), tant au niveau perceptif (Jacobs & Shiffrar, 2005) qu'au niveau exécutif (Brass et al., 2001).

Apport de l'imagerie motrice au champ théorique de la dyslexie

L'imagerie motrice, comme un moyen d'exploration de la qualité des représentations sensorimotrices semble pouvoir apporter des réponses sur l'implication d'un déficit des représentations internes de l'action dans la dyslexie. Les représentations internes sont définies comme l'ensemble de connaissances implicites de la totalité ou de parties du corps, du monde extérieur et de leurs interactions mais aussi les caractéristiques spatio-temporelles de l'action et de ses conséquences (Wolpert & Ghahramani, 2000). Elles sont déterminantes pour exécuter, simuler et percevoir une action. L'IM est un processus mental au cours duquel un mouvement est simulé mentalement sans aucune sortie motrice manifeste (Jeannerod, 1995). D'ailleurs, les réseaux neuronaux impliqués dans l'IM se chevauchent, dans une large mesure, avec ceux recrutés pour l'exécution motrice réelle (EM), qui comprennent le cortex prémoteur dorsal (PmD), l'aire motrice supplémentaire (SMA), le sillon intrapariétal (IPS) et le gyrus supramarginal du lobe pariétal inférieur (IPL). De plus, les bases neurales de l'IM chevauchent largement celles de la représentation du corps en action (Cignetti et al., 2016 ; Fontan et al., 2017).

VERS UN LIEN FONCTIONNEL ENTRE LES PROFILS SENSORIMOTEURS ET PHONEMIQUES CHEZ DE JEUNES ADULTES DYSLEXIQUES ? : des premières données

Dans une série d'études récentes, Marchetti et collègues (Marchetti et al., 2019 ; Marchetti et al., en révision ; Marchetti et al., soumis) ont évalué la prévalence de la comorbidité des déficits phonologiques et sensorimoteurs dans une population de 52 dyslexiques étudiants à l'université comparés à 57 étudiants contrôles normo-lecteurs. En comparant le groupe de normo-lecteurs à deux groupes de dyslexiques, avec ou sans syndrome sensorimoteur, ces études avaient également pour objectif de déterminer si cette comorbidité s'accompagnait de déficits spécifiques dans certains traitements phonologiques liés à la lecture tels que ceux engagés dans les tâches de conscience phonémique et si ces déficits pouvaient avoir une origine articulatoire comme certains modèles de la perception de la parole permettent de l'envisager (par exemple, Skipper et al., 2007). De plus, la qualité des représentations du corps entier a été évaluée précisément pour en déterminer un possible déficit dans les groupes dyslexiques. La question était de savoir si l'atteinte des représentations phonémiques était associée ou non à une atteinte plus globale des représentations sensorimotrices du corps dans le groupe des dyslexiques présentant une comorbidité.

Forte prévalence de la comorbidité sensorimotrice chez les adultes dyslexiques

En l'absence de tests internationaux disponibles chez l'adulte pour évaluer finement la sensorimotricité et en accord avec les recommandations internationales de diagnostic et traitement et de recherche sur les TDC (Blank et al., 2019), les troubles sensorimoteurs ont été évalués à l'aide du M-ABC, couramment utilisé en clinique pour détecter des déficits sensorimoteurs chez l'enfant et l'adolescent (Marchetti et al., 2019 ; Marchetti et al., en révision). Nous avons ainsi montré une forte prévalence de troubles sensorimoteurs chez les participants dyslexiques à la différence des participants normo-lecteurs. Plus précisément, la présence de troubles sensorimoteurs dans la population de dyslexiques était supérieure à 25 % alors qu'elle était de 5% dans la population de normo-lecteurs (Marchetti et al., 2019 ; Marchetti et al., soumis), confirmant ainsi les données rapportées antérieurement dans un groupe tout venant (Zoia et al., 2006 ; APA, 2013). Cette comorbidité observée dans le groupe de participants dyslexiques pourrait, de surcroît, se révéler plus importante si le M-ABC était complété dans des travaux ultérieurs par une étude posturale exhaustive, qui est principalement rapportée comme impacté dans les populations de DCD (Adams et al., 2014 ; Wilson et al., 2013, 2017). Néanmoins, ce pourcentage élevé de comorbidité entre dyslexie et troubles sensorimoteurs, dans une population de jeunes adultes, questionne particulièrement. Ainsi en raison de profils dyslexiques polymorphes (voir Pennington et al., 2006 ; Van Bergen et al. 2014) et du recul des hypothèses sur une étiologie unique et suffisante de la dyslexie, la prévalence et l'impact de la comorbidité sensorimotrice dans les déficits de la dyslexie méritent d'être à nouveau interrogés.

Atteinte des représentations phonémiques plus importante chez les adultes dyslexiques avec troubles sensorimoteurs

L'efficacité des représentations phonémiques ont été évaluées à l'aide d'une tâche de conscience phonémique administrée aux trois groupes de participants. Dans cette tâche, ceux-ci entendaient des pseudo-mots composés de trois phonèmes (structure consonne-consonne-voyelle ; par exemple, /spo/, /djan/) à travers un casque, et devaient produire oralement la séquence phonémique obtenue en supprimant le premier phonème (par exemple, /po/, /jan/). Le temps de réponse, le temps nécessaire pour accomplir chaque tâche a été mesuré.

La possibilité de troubles auditifs a été écartée avec l'évaluation des seuils auditifs des participants. Ainsi, les résultats à la tâche de conscience phonémique (voir Figure 1) ont permis d'observer des temps de réponse plus longs pour le groupe dyslexique avec comorbidité par rapport au groupe sans comorbidité et au groupe contrôle, les deux groupes de dyslexiques étant moins performants que le groupe contrôle.

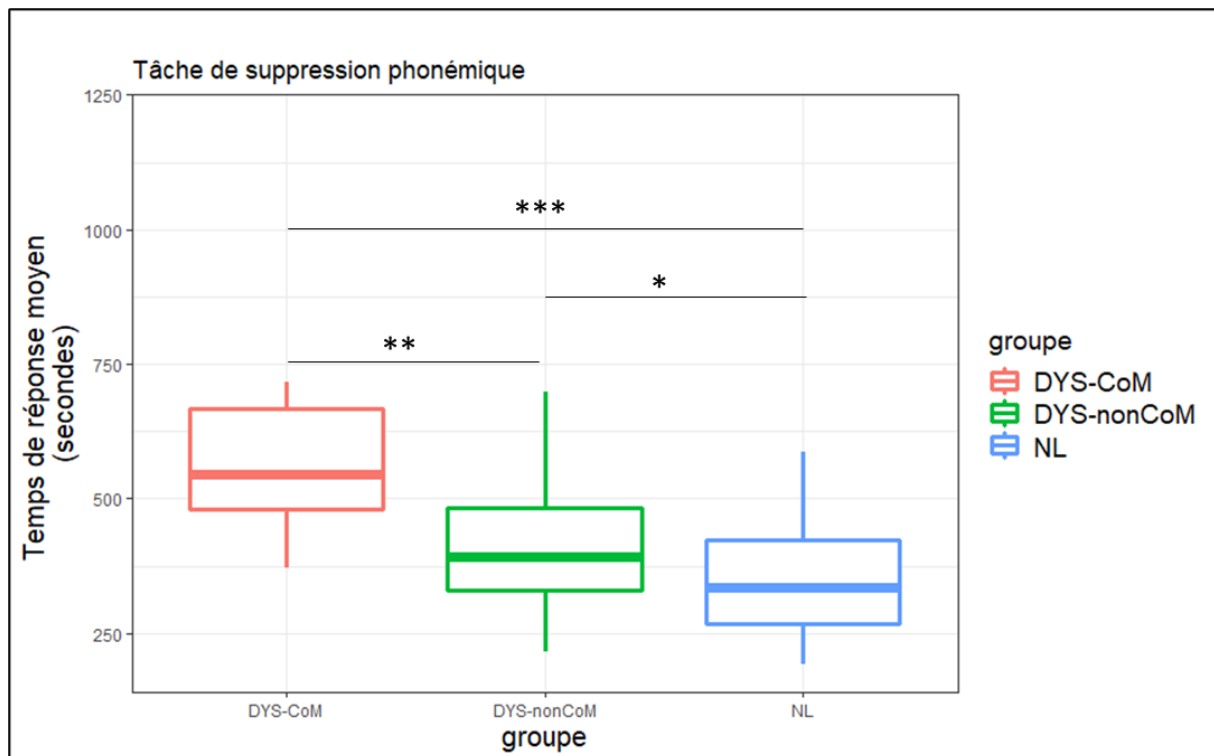


Figure 1. Tâche de suppression phonémique : boxplot avec médiane, intervalles interquartiles et intervalle de confiance du temps de réponse moyen pour les 3 groupes (NL : contrôles ; DYS-nonCoM : dyslexiques sans comorbidité sensorimotrice ; DYS-CoM : dyslexiques avec comorbidité sensorimotrice). $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

Motricité articulaire impactée chez les adultes dyslexiques avec troubles sensorimoteurs

L'efficacité de la motricité articulaire de la parole a été évaluée à l'aide d'une tâche de diadococinésie articulaire où les participants devaient répéter des séquences complexes de syllabes sans signification, composées de trois syllabes alternées /pa, /ta/ et /ka/. On constate que le groupe comorbide se distingue du groupe contrôle et du groupe de dyslexiques sans comorbidité par des performances plus faibles. Des analyses de régression révèlent également que les performances à cette tâche expliquent une part significative de la variance des performances à la tâche de conscience phonémique. Ainsi, les déficits phonologiques (et plus particulièrement phonémiques) constatés s'accompagneraient dans le groupe avec une comorbidité sensorimotrice d'une moindre efficacité des programmes moteurs de la parole.

Qualité des représentations sensorimotrices affectée chez les adultes dyslexiques avec troubles sensorimoteurs

Concernant les représentations du corps en action, celles-ci ont été évaluées à l'aide d'un protocole d'idéation motrice au cours duquel les participants devaient successivement exécuter une action et s'imaginer en train de réaliser cette même action dans un ensemble de 8 tâches empruntées à la vie courante. Dans les deux cas, les sujets mesuraient eux-mêmes la durée de l'action, exécutée et imaginée, à l'aide d'un chronomètre (Marchetti et al., 2019 ; Marchetti et

al., en révision). Parmi les tâches proposées, certaines impliquaient le corps entier, comme la marche, ou les membres supérieurs avec des tâches de saisies ; d'autres impliquaient des activités langagières avec ou sans production orale, comme la répétition et la lecture. Il ressort de cette étude un ralentissement moteur généralisé à l'ensemble des sujets dyslexiques, que la tâche implique l'ensemble du corps ou simplement la sphère orale (répétition, lecture à voix haute). En revanche, seuls les dyslexiques comorbides présentent des représentations sensorimotrices moins performantes que les normolecteurs (Marchetti et al., 2019 ; Marchetti et al., en révision). Ainsi, le "déficit de modélisation interne" souvent mis en avant dans le trouble développemental de la coordination (TDC) (Deconinck et al., 2009 ; Gabbard & Bobbio 2011 ; Wilson et al., 2013 ; Adams et al., 2014, 2017 ; Assaiante, 2019) semble être partagé par un sous-groupe de sujets dyslexiques. Des déficits similaires ont été observés chez des adolescents atteints de dyslexie développementale (voir Van de Walle de Ghelcke et al., 2020).

Enfin, la qualité subjective (auto-évaluée) des performances d'imagerie motrice a été jugée meilleure par les normolecteurs par rapport aux deux groupes de dyslexiques avec ou sans syndrome sensorimoteur. Cependant, il est à signaler qu'aucune corrélation entre la qualité de l'imagerie motrice subjective n'a été établie, ni avec l'indice de performance, ni avec les scores de lecture. Étant donné que la perte d'estime de soi et d'efficacité personnelle a été démontrée chez les personnes dyslexiques tout au long de leur vie (Humphrey et al., 2002 ; Alexander-Passe 2006 ; Nalavany et al., 2017), les adultes dyslexiques pourraient être enclins à sous évaluer leurs compétences, alors même que celles-ci sont similaires à celles des normolecteurs.

CONCLUSION :

Avec une importante comorbidité des troubles phonologiques et sensorimoteurs observée chez de jeunes adultes dyslexiques, les résultats rapportés suggèrent un lien fonctionnel entre les systèmes langagiers (perception de la parole) et sensorimoteurs de l'ensemble du corps. Ils soutiennent l'hypothèse selon laquelle ces systèmes peuvent être considérés comme intégrés, c'est-à-dire présentant des mécanismes communs, supportés par le couplage perception-action.

Les comorbidités des troubles de lecture (dyslexie) et des troubles du calcul (dyscalculie) sont en général bien identifiées lors de l'examen clinique de l'adulte, ce qui est moins le cas de la comorbidité sensorimotrice que nous avons précisément évaluée dans les expériences relatées. Ainsi, une vigilance est à envisager lors du diagnostic d'un trouble du développement, tel que la dyslexie, avec la recherche de potentiels troubles associés, tels qu'un syndrome sensorimoteur. En effet, les risques cognitifs liés à la comorbidité méritent un diagnostic au-delà de la sphère langagière et une prise en charge spécifique dans les deux domaines impactés. De plus, les résultats rapportés sont en faveur d'une conception multifactorielle de la dyslexie (Pennington et al., 2012 ; Van Bergen et al., 2014).

Enfin, la question de l'impact de la comorbidité sensorimotrice dans les manifestations de la dyslexie reste légitimement posée. En effet, nous avons observé dans les études que nous avons conduites que les performances en lecture (lecture de mots isolés, lecture de pseudomots) ne diffèrent pas entre les deux groupes de dyslexiques (ces performances étant significativement inférieures à celles du groupe contrôle). On pourrait donc en déduire que la comorbidité avec les troubles moteurs ne conduit pas à plus de sévérité des troubles de la lecture. Toutefois, l'étude de Downing et Caravolas (2020) rapporte des résultats inverses : des enfants dyslexiques avec des troubles sensorimoteurs ont des performances en lecture plus troublées que celle d'un groupe dyslexique sans comorbidité. On peut envisager que les adultes

dyslexiques qui parviennent à poursuivre des études de niveau universitaire constituent un échantillon particulier de dyslexiques qui ont pu développer des stratégies adaptatives de lecture, ce qui ne seraient pas, encore le cas chez les enfants (Colé, Duncan & Cavalli, 2020). Ce fait suggère une difficulté supplémentaire dans l'établissement des comorbidités chez l'adulte dyslexique. Pour avancer significativement sur la question de l'impact de la comorbidité sensorimotrice dans les manifestations de la dyslexie, un groupe de jeunes dyspraxiques non dyslexiques demande à être analysé précisément à la fois au niveau d'un éventuel déficit phonologique et d'une éventuelle atteinte des représentations internes de l'action. Une telle étude est actuellement envisagée.

REFERENCES :

- Adams, I. L. J., Lust, J. M., Wilson, P. H., & Steenbergen, B. (2014). Compromised motor control in children with DCD : A deficit in the internal model?—A systematic review. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 47, 225-244. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2014.08.011>
- Adams, I. L. J., Lust, J. M., Wilson, P. H., & Steenbergen, B. (2017). Development of motor imagery and anticipatory action planning in children with developmental coordination disorder – A longitudinal approach. *Human Movement Science*, 55, 296-306. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2017.08.021>
- Alexander-Passe, N. (2006). How dyslexic teenagers cope : An investigation of self-esteem, coping and depression. *Dyslexia*, 12(4), 256-275. <https://doi.org/10.1002/dys.318>
- American Psychiatric Association. (2013). Diagnostic and statistical manual of mental disorders : DSM-5. London American Psychiatric Publishing.
- Assaïante, C., Barlaam, F., Cignetti, F., & 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>
- Assaïante Christine, Vaugoyeau, M., & Cignetti, Fabien. (2019). Contrôle anticipé chez des enfants de 8 à 12 ans avec des troubles des apprentissages : Importance de la comorbidité. *Neurophysiologie Clinique*. <https://doi.org/10.1016/j.neucli.2019.10.120>

- Assaiante, C. (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" *ANAE*, 168, 535-542.
- Barela, J. A., Freitas, P. B. de, Viana, A. R., & Razuk, M. (2014). Dyslexia and the Integration of Sensory Cues into Motor Action. *Psychology*, 05(16), 1870-1878.
<https://doi.org/10.4236/psych.2014.516192>
- Blank, R., Barnett, A., ... Wilson, P., Vinçon, S. (2019). International clinical practice recommendations on the definition, diagnosis, assessment, intervention and psychosocial aspects de developmental coordination disorder. *Developmental Medecine and Child Neurology*, 61: 242-285.
- Blau, V., Reithler, J., van Atteveldt, N., Seitz, J., Gerretsen, P., Goebel, R., & Blomert, L. (2010). Deviant processing of letters and speech sounds as proximate cause of reading failure : A functional magnetic resonance imaging study of dyslexic children. *Brain*, 133(3), 868-879.
<https://doi.org/10.1093/brain/awp308>
- Boets, B., Op de Beeck, H. P., Vandermosten, M., Scott, S. K., Gillebert, C. R., Mantini, D., Bulthe, J., Sunaert, S., Wouters, J., & Ghesquiere, P. (2013). Intact But Less Accessible Phonetic Representations in Adults with Dyslexia. *Science*, 342(6163), 1251-1254.
<https://doi.org/10.1126/science.1244333>
- Borghi, A. M., & Cimatti, F. (2010). Embodied cognition and beyond : Acting and sensing the body. *Neuropsychologia*, 48(3), 763-773.
<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.10.029>
- Boulenger, V., Hauk, O., & Pulvermuller, F. (2009). Grasping Ideas with the Motor System : Semantic Somatotopy in Idiom Comprehension. *Cerebral Cortex*, 19(8), 1905-1914.
<https://doi.org/10.1093/cercor/bhn217>

- Brass, M., Bekkering, H., & Prinz, W. (2001). Movement observation affects movement execution in a simple response task. *Acta Psychologica*, 20.
- Bucci, M. P., Gerard, C. L., & Bui-Quoc, E. (2013). The effect of a cognitive task on the postural control of dyslexic children. *Research in Developmental Disabilities*, 34(11), 3727-3735.
<https://doi.org/10.1016/j.ridd.2013.07.032>
- Calvo-Merino, B., Grèzes, J., Glaser, D. E., Passingham, R. E., & Haggard, P. (2006). Seeing or Doing? Influence of Visual and Motor Familiarity in Action Observation. *Current Biology*, 16(19), 1905-1910. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2006.07.065>
- Carroll, J. M., & Iles, J. E. (2006). An assessment of anxiety levels in dyslexic students in higher education. *The British Psychological Society*.
- Castles, A., Rastle, K., & Nation, K. (2018). Ending the Reading Wars : Reading Acquisition From Novice to Expert. *Psychological Science in the Public Interest*, 19(1), 5-51.
<https://doi.org/10.1177/1529100618772271>
- Cavalli, E., Colé, P., Leloup, G., Poracchia-George, F., Sprenger-Charolles, L., & El Ahmadi, A. (2018). Screening for Dyslexia in French-Speaking University Students : An Evaluation of the Detection Accuracy of the *Alouette* Test. *Journal of Learning Disabilities*, 51(3), 268-282.
<https://doi.org/10.1177/0022219417704637>
- Cavalli, E., Duncan, L. G., Elbro, C., El Ahmadi, A., & Colé, P. (2017). Phonemic-Morphemic dissociation in university students with dyslexia : An index of reading compensation? *Annals of Dyslexia*, 67(1), 63-84. <https://doi.org/10.1007/s11881-016-0138-y>
- Chaix, Y., Albaret, J.-M., Brassard, C., Cheuret, E., de Castelnaud, P., Benesteau, J., Karsenty, C., & Démonet, J.-F. (2007). Motor impairment in dyslexia : The influence of attention disorders. *European Journal of Paediatric Neurology*, 11(6), 368-374.
<https://doi.org/10.1016/j.ejpn.2007.03.006>

- Cignetti, F., Vaugoyeau, M., Fontan, A., Jover, M., Livet, M.-O., Hugonenq, C., Audic, F., Chabrol, B., & Assaiante, C. (2018). Feedforward motor control in developmental dyslexia and developmental coordination disorder : Does comorbidity matter? *Research in Developmental Disabilities*, 76, 25-34. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2018.03.001>
- Colé, P., Duncan, L. G., & Cavalli, E. (2020). Les compensations de l'adulte dyslexique de niveau universitaire. *La dyslexie à l'âge adulte: Approche neuropsychologique*, 287-324.
- Colé, P., & Sprenger-Charolles, L. (2021). *La dyslexie : De l'enfant à l'adulte*. Dunod.
- Craighero, L., Bello, A., Fadiga, L., & Rizzolatti, G. (2002). Hand action preparation influences the responses to hand pictures. *Neuropsychologia*, 40(5), 492-502. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(01\)00134-8](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(01)00134-8)
- Dalla Volta, R., Fabbri-Destro, M., Gentilucci, M., & Avanzini, P. (2014). Spatiotemporal dynamics during processing of abstract and concrete verbs : An ERP study. *Neuropsychologia*, 61, 163-174. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2014.06.019>
- de Beer, J., Engels, J., Heerkens, Y., & van der Klink, J. (2014). Factors influencing work participation of adults with developmental dyslexia : A systematic review. *BMC Public Health*, 14(1), 77.
- Decety, J. (1999). Neural mechanisms subserving the perception of human actions. *Trends in Cognitive Sciences*, 3(5), 172-178. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(99\)01312-1](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(99)01312-1)
- Deconinck, F. J. A., Spitaels, L., Fias, W., & Lenoir, M. (2009). Is developmental coordination disorder a motor imagery deficit? *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 31(6), 720-730. <https://doi.org/10.1080/13803390802484805>
- Dickie, C., Ota, M., & Clark, A. (2013). Revisiting the phonological deficit in dyslexia : Are implicit nonorthographic representations impaired? *Applied Psycholinguistics*, 34(4), 649-672. <https://doi.org/10.1017/S0142716411000907>

- di Pellegrino, G., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V., & Rizzolatti, G.. (1992). Understanding motor events : A neurophysiological study. *Experimental Brain Research*.
- Downing, C., & Caravolas, M. (2020). Prevalence and Cognitive Profiles of Children With Comorbid Literacy and Motor Disorders. *Frontiers in Psychology*, *11*, 573580.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.573580>
- Eckert, M. A., Berninger, V. W., Vaden, K. I., Gebregziabher, M., & Tsu, L. (2016). Gray Matter Features of Reading Disability : A Combined Meta-Analytic and Direct Analysis Approach(1,2,3,4). *ENeuro*, *3*(1). <https://doi.org/10.1523/ENEURO.0103-15.2015>
- Fontan, A., Cignetti, F., Nazarian, B., Anton, J.-L., Vaugoyeau, M., & Assaiante, C. (2017). How does the body representation system develop in the human brain? *Developmental Cognitive Neuroscience*, *24*, 118-128. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2017.02.010>
- Gabbard, C., & Bobbio, T. (2011). The Inability To Mentally Represent Action May Be Associated With Performance Deficits in Children With Developmental Coordination Disorder. *International Journal of Neuroscience*, *121*(3), 113-120.
- Gallese, V., Fadiga, L., Fogassi, L., & Rizzolatti, G. (1996). Action recognition in the premotor cortex. *Brain*, *119*(2), 593-609. <https://doi.org/10.1093/brain/119.2.593>
- Glazzard, J. (2010). The impact of dyslexia on pupils' self-esteem. *Support for Learning*, *25*(2), 63-69. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9604.2010.01442.x>
- Goswami, U. (2000). *Phonological representations, reading development and dyslexia : Towards a cross-linguistic theoretical framework*. 19.
- Grabski, K., & Sato, M. (2020). Adaptive phonemic coding in the listening and speaking brain. *Neuropsychologia*, *136*, 107267. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2019.107267>
- Haft, S. L., Myers, C. A., & Hoeft, F. (2016). Socio-emotional and cognitive resilience in children with reading disabilities. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, *10*, 133-141.
<https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2016.06.005>

- Harm, M. W., & Seidenberg, M. S. (1999). Phonology, Reading Acquisition, and Dyslexia : Insights from Connectionist Models. *Psychological Review*, 46.
- Hickok, G., & Poeppel, D. (2007). The cortical organization of speech processing. *Nature Reviews. Neuroscience*, 8(5), 393-402. <https://doi.org/10.1038/nrn2113>
- Humphrey, N., & Mullins, Patricia M. (2002). Self-Concept and Self-Esteem in Developmental Dyslexia : Implications for Theory and Practice. *Journal of Research in Special Educational Needs*, v2(n2), p1-13.
- Hyde, C. (2014). Motor imagery is less efficient in adults with probable developmental coordination disorder : Evidence from the hand rotation task. *Research in Developmental Disabilities*, 9.
- INSERM (dir.). Dyslexie, dysorthographe, dyscalculie : bilan des données scientifiques. Rapport. Paris : Les éditions Inserm, 2007, XV - 842 p. -(Expertise collective). - <http://hdl.handle.net/10608/110>
- INSERM. (2019). *Trouble développemental de la coordination ou dyspraxie* (EDP Sciences).
- Iversen, S., Berg, K., Ellertsen, B., & Tønnessen, F.-E. (2005). Motor coordination difficulties in a municipality group and in a clinical sample of poor readers. *Dyslexia*, 11(3), 217-231.
- Jacobs, A., & Shiffrar, M. (2005). Walking Perception by Walking Observers. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 31(1), 157-169. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.31.1.157>
- Jeannerod, M. (1995). Mental imagery in the motor context. *Neuropsychologia*, 33(11), 1419-1432. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(95\)00073-C](https://doi.org/10.1016/0028-3932(95)00073-C)
- Kapoula, Z., Gaertner, C., & Matheron, E. (2012). Spherical Lenses and Prisms Lead to Postural Instability in Both Dyslexic and Non Dyslexic Adolescents. *PLOS ONE*, 7(11), e46739. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0046739>

- Liberman, I., Shankweiler, D., & Liberman, A.. (1989). The alphabetic Principle and Learning To Read.
- Malek, A., Amiri, S., Hekmati, I., Pirzadeh, J., & Gholizadeh, H. (2013). A Comparative Study on Diadochokinetic Skill of Dyslexic, Stuttering, and Normal Children. *ISRN Pediatrics*, 2013, 1-7. <https://doi.org/10.1155/2013/165193>
- Marchetti, R., Vaugoyeau, M., Cole, P., & Assaiante, C. (2019). Exploration des représentations sensorimotrices chez le jeune adulte dyslexique. *Neurophysiologie Clinique*, 49(6), 450. <https://doi.org/10.1016/j.neucli.2019.10.119>
- Mengisidou, M., & Marshall, C. R. (2019). Deficient Explicit Access to Phonological Representations Explains Phonological Fluency Difficulties in Greek Children With Dyslexia and/or Developmental Language Disorder. *Frontiers in Psychology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.00638>
- Nalavany, B. A., Logan, J. M., & Carawan, L. W. (2017). The relationship between emotional experience with dyslexia and work self-efficacy among adults with dyslexia. *Dyslexia*, 24(1), 17-32. <https://doi.org/10.1002/dys.1575>
- Needle, J. L., Fawcett, A. J., & Nicolson, R. I. (2006). Balance and dyslexia : An investigation of adults' abilities. *European Journal of Cognitive Psychology*, 18(6), 909-936. <https://doi.org/10.1080/09541440500412304>
- Nicolson, R. I., & Fawcett, A. J. (1999). *Developmental dyslexia : The role of the cerebellum*. 23.
- Nicolson, R. I., & Fawcett, A. J. (2011). Dyslexia, dysgraphia, procedural learning and the cerebellum. *Cortex*, 47(1), 117-127. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2009.08.016>
- Nicolson, R. I., Fawcett, A. J., & 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)

- OECD. (2013). OECD Skills Outlook 2013 : First Results from the Survey of Adult Skills. *OECD*.
<https://doi.org/10.1787/9789264204256-en>
- Pennington, B. F., Santerre-Lemmon, L., Rosenberg, J., MacDonald, B., Boada, R., Friend, A., Leopold, D. R., Samuelsson, S., Byrne, B., Willcutt, E. G., & Olson, R. K. (2012). Individual prediction of dyslexia by single versus multiple deficit models. *Journal of Abnormal Psychology*, 121(1), 212-224. <https://doi.org/10.1037/a0025823>
- Pia Bucci, M., Bui-Quoc, E., & Gerard, C.-L. (2013). The Effect of a Stroop-like Task on Postural Control in Dyslexic Children. *PLoS ONE*, 8(10), e77920.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0077920>
- Pozzo, T., Vernet, P., Creuzot-Garcher, C., Robichon, F., Bron, A., & Quercia, P. (2006). Static postural control in children with developmental dyslexia. *Neuroscience Letters*, 403(3), 211-215. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2006.03.049>
- Pulvermüller, F. (2005). Brain mechanisms linking language and action. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(7), 576-582. <https://doi.org/10.1038/nrn1706>
- Quercia, P., Demougeot, L., Santos, M., & Bonnetblanc, F. (2011). Integration of proprioceptive signals and attentional capacity during postural control are impaired but subject to improvement in dyslexic children. *Experimental brain research. Experimentelle Hirnforschung. Expérimentation cérébrale*, 209, 599-608. <https://doi.org/10.1007/s00221-011-2593-3>
- Ramus, F. (2003a). 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, Franck. (2003b). Developmental dyslexia : Specific phonological deficit or general sensorimotor dysfunction? *Current Opinion in Neurobiology*, 13(2), 212-218.
[https://doi.org/10.1016/S0959-4388\(03\)00035-7](https://doi.org/10.1016/S0959-4388(03)00035-7)

- Ramus, Franck. (2014). Neuroimaging sheds new light on the phonological deficit. *in dyslexia. Trends in Cognitive Sciences*, 274-275.
- Ramus, Franck, & Ahissar, M. (2012). Developmental dyslexia : The difficulties of interpreting poor performance, and the importance of normal performance. *Cognitive Neuropsychology*, 29(1-2), 104-122. <https://doi.org/10.1080/02643294.2012.677420>
- Ramus, Franck, Marshall, C. R., Rosen, S., & van der Lely, H. K. J. (2013). Phonological deficits in specific language impairment and developmental dyslexia : Towards a multidimensional model. *Brain*, 136(2), 630-645. <https://doi.org/10.1093/brain/aws356>
- Ramus, Franck, & Szenkovits, G. (2008). What Phonological Deficit? *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 61(1), 129-141. <https://doi.org/10.1080/17470210701508822>
- Repetto, C., Colombo, B., Cipresso, P., & Riva, G. (2013). The effects of rTMS over the primary motor cortex : The link between action and language. *Neuropsychologia*, 51(1), 8-13. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2012.11.001>
- Rizzolatti, G., Carmarda, R., Fogassi, L., Gentilucci, M., Luppino,, G. & Matelli, M. (1988). *Functional organization of inferior area 6 in the macaque monkey*.
- Rizzolatti, G., Fogassi, L., & Gallese, V. (2001). Neurophysiological mechanisms underlying the understanding and imitation of action. *Nature Reviews Neuroscience*, 2(9), 661-670. <https://doi.org/10.1038/35090060>
- Rizzolatti, G., Fogassi, L., & Gallese, V. (2002). Motor and cognitive functions of the ventral premotor cortex. *Current Opinion in Neurobiology*, 12(2), 149-154. [https://doi.org/10.1016/S0959-4388\(02\)00308-2](https://doi.org/10.1016/S0959-4388(02)00308-2)
- Savage, R. (2004). Motor skills, automaticity and developmental dyslexia : A review of the research literature. *Reading and Writing*, 301-324.
- Schwartz, J.-L., Basirat, A., Ménard, L., & Sato, M. (2012). The Perception-for-Action-Control Theory (PACT) : A perceptuo-motor theory of speech perception. *Journal of Neurolinguistics*, 25(5), 336-354.

- Shaywitz, S. E., & Shaywitz, B. A. (2005). Dyslexia (Specific Reading Disability). *Biological Psychiatry*, 57(11), 1301-1309.
- Sirigu, A., Cohen, L., Duhamel, J. R., Pillon, B., Dubois, B., Agid, Y., & Pierrot-Deseilligny, C. (1995). *Congruent unilateral impairments for real and imagined hand movements*.
- Skipper, J. I., Devlin, J. T., & Lametti, D. R. (2017). The hearing ear is always found close to the speaking tongue : Review of the role of the motor system in speech perception. *Brain and Language*, 164, 77-105. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2016.10.004>
- Snowling, Maggie, & Frith, U. (1981). The role of sound, shape and orthographic cues in early reading. *British Journal of Psychology*, 72(1), 83-87. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.1981.tb02164.x>
- Snowling, Margaret, Bishop, D. V. M., & Stothard, S. E. (2000). *Is Preschool Language Impairment a Risk Factor for Dyslexia in Adolescence ? Dyslexia*.14.
- Soroli, E., Szenkovits, G., & Ramus, F. (2010). Exploring dyslexics' phonological deficit III : Foreign speech perception and production. *Dyslexia*, 16(4), 318-340. <https://doi.org/10.1002/dys.415>
- Stoodley, C. J., & Stein, J. F. (2011). The cerebellum and dyslexia. *Cortex*, 47(1), 101-116. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2009.10.005>
- Stoodley, C. J., & Stein, J. F. (2013). Cerebellar Function in Developmental Dyslexia. *The Cerebellum*, 12(2), 267-276. <https://doi.org/10.1007/s12311-012-0407-1>
- Szenkovits, G., Darma, Q., Darcy, I., & Ramus, F. (2016). Exploring dyslexics' phonological deficit II : Phonological grammar. *First Language*, 36(3), 316-337. <https://doi.org/10.1177/0142723716648841>
- Talla, P. (1980). Auditory temporal perception, phonics, and reading disabilities in children. *Brain and Language*, 9(2), 182-198.

- Tallal, P., Piercy, M. (1973). Defect of non-verbal auditory perception in children with developmental aphasia. *Nature*, 241(5390), 468-469.
- Vaivre-Douret, L. ; Mazeau, M. ; Jolly, C. ; Huron, C. ; Arnaudi, C., Gonzalez-Monge, S. ; Assaiante, C. (2021). L'expertise collective de l'Inserm sur le trouble développemental de la coordination ou dyspraxie : état des principaux travaux et recommandations. *Neuropsychiatrie de l'enfance et de l'adolescence*. <https://doi.org/10.1016/j.neurenf.2021.07.002>
- Vandermosten, M., Correia, J., Vanderauwera, J., Wouters, J., Ghesquière, P., & Bonte, M. (2020). Brain activity patterns of phonemic representations are atypical in beginning readers with family risk for dyslexia. *Developmental Science*, 23(1). <https://doi.org/10.1111/desc.12857>
- van de Walle de Ghelcke, A., Skoura, X., Edwards, M. G., Quercia, P., & Papaxanthis, C. (2020). Action representation deficits in adolescents with developmental dyslexia. *Journal of Neuropsychology*, jnp.12220. <https://doi.org/10.1111/jnp.12220>
- van Bergen, E., van der Leij, A., & de Jong, P. F. (2014). The intergenerational multiple deficit model and the case of dyslexia. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00346>
- Varela, F., Thompson, E., & Rosch, E. (1991). *The Embodied Mind : Cognitive Science and Human Experience*. MIT Press.
- Vellutino, F. R. (1979). The Validity of Perceptual Deficit Explanations of Reading Disability : A Reply to Fletcher and Satz. *Journal of Learning Disabilities*, 12(3), 160-167. <https://doi.org/10.1177/002221947901200307>
- Vellutino, F. R., Fletcher, J. M., Snowling, M. J., & Scanlon, D. M. (2004). Specific reading disability (dyslexia) : What have we learned in the past four decades? *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 45(1), 2-40. <https://doi.org/10.1046/j.0021-9630.2003.00305.x>

- Vieira, S., Quercia, P., Michel, C., Pozzo, T., & Bonnetblanc, F. (2009). Cognitive demands impair postural control in developmental dyslexia : A negative effect that can be compensated. *Neuroscience Letters*, 462(2), 125-129. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2009.06.093>
- Willcutt, E. G., & Pennington, B. F. (2000). Psychiatric Comorbidity in Children and Adolescents with Reading Disability. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 41(8), 1039-1048. <https://doi.org/10.1111/1469-7610.00691>
- Wilson, P. H., Ruddock, S., Smits-Engelsman, B., Polatajko, H., & Blank, R. (2013). Understanding performance deficits in developmental coordination disorder : A meta-analysis of recent research: Review. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 55(3), 217-228. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2012.04436.x>
- Wilson, P. H., Smits-Engelsman, B., Caeyenberghs, K., Steenbergen, B., Sugden, D., Clark, J., Mumford, N., & 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. <https://doi.org/10.1111/dmcn.13530>
- Wimmer, H., Mayringer, H., & Raberger, T. (1999). Raberger T. Reading and dual-task balancing : Evidence against the automatization deficit explanation of developmental dyslexia. *J Learn Disabil.*
- Wolpert, D. M., & Ghahramani, Z. (2000). Computational principles of movement neuroscience. *Nature Neuroscience*, 3(S11), 1212-1217. <https://doi.org/10.1038/81497>
- Zoia, S., Barnett, A., Wilson, P., & Hill, E. (2006). Developmental Coordination Disorder : Current issues. *Child: Care, Health and Development*, 32(6), 613-618. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2214.2006.00697.x>