Chapitre 6

Un déficit de l'empan visuo-attentionnel est-il à l'origine de certaines formes de dyslexies chez l'enfant ?

Sylviane Valdois

Introduction

L'existence même de dyslexies d'origine visuelle ou visuo-attentionnelle (VA) est encore aujourd'hui largement discutée et fréquemment contestée. Il est assez fréquent de lire sous la plume de chercheurs de renom que « la dyslexie [au singulier] a une origine phonologique » ou que « la lecture est bien évidemment une activité linguistique, quelquefois considérée à tort comme visuelle[1] » (Goswami, 2015). Ce débat agite le milieu scientifique depuis plus d'un siècle. À la fin du XIXe siècle, le trouble sévère d'apprentissage de la lecture que présentaient certains enfants, pourtant intelligents, était qualifié de cécité verbale congénitale (Hinshelwood, 1917). On affirmait alors clairement la nature visuelle du déficit et on insistait même volontiers sur les bonnes aptitudes langagières de ces mêmes enfants (Morgan, 1896). Mais au XXe siècle, les travaux de Franck Vellutino (1979) viennent contester l'hypothèse visuelle pour conforter une origine langagière, notamment phonologique, des troubles dyslexiques. Cette hypothèse est encore largement dominante aujourd'hui.

L'existence de troubles intéressant la sphère visuelle (troubles visuels ou VA) est cependant largement documentée en contexte dyslexique. La question n'est

1. « *Learning to read is sometimes erroneously considered to be a visual skill, but it is actually a linguistic process*. » (Goswami, 2015, p. 43.)

Les dyslexies du développement
© 2023 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

donc pas tant de savoir si les enfants dyslexiques, ou au moins certains d'entre eux, présentent des troubles de nature visuelle mais plutôt de déterminer dans quelle mesure ces troubles peuvent être tenus pour responsables de leurs difficultés d'apprentissage de la lecture.

Il faut préciser au préalable que les troubles visuels dont il sera question ici ne sont évidemment pas des troubles de l'acuité visuelle. Tout le monde s'accorde sur le fait que les malvoyants puissent avoir du mal à lire, mais on ne parle pas de dyslexie dans ce cas. La question posée ici porte sur les anomalies des traitements visuels secondaires à un dysfonctionnement des réseaux cérébraux impliqués dans le traitement de l'information visuelle. De la même façon, le terme de trouble VA renvoie très spécifiquement au rôle joué par l'attention dans le traitement des informations visuelles et notamment aux mécanismes attentionnels impliqués en lecture. Cette notion est tout à fait indépendante des troubles de l'attention avec ou sans hyperactivité qui, par ailleurs, peuvent être associés au trouble dyslexique.

Quatre grands types de troubles visuels ont été décrits dans le cadre des dyslexies développementales : des troubles des traitements visuels de bas niveau relevant d'un dysfonctionnement du système visuel magnocellulaire (Boden & Giaschi, 2007 ; Livingstone *et al.*, 1991 ; Stein, 2018, 2019 ; Stein & Walsh, 1997) ; des troubles du déplacement de l'attention visuelle (Facoetti, *et al.*, 2001 ; Facoetti, *et al.*, 2006) ; un phénomène d'interférences latérales excessives ou *crowding* (Spinelli *et al.*, 2002 ; Martelli *et al.*, 2009) ; un trouble de l'empan VA (Bosse *et al.*, 2007 ; Valdois, 2022). Ces troubles se répartissent en deux grandes catégories selon qu'ils s'accompagnent ou non d'un trouble phonologique. En fait, les déficits magnocellulaires, d'abord décrits en modalité visuelle, se sont révélés être également présents en modalité auditive (Witton *et al.*, 1998). De la même façon, les déficits de déplacement de l'attention visuelle ont été mis en évidence non seulement en modalité visuelle mais également en modalité auditive (Hari & Renvall, 2001 ; Facoetti *et al.*, 2003 ; Facoetti *et al.*, 2010 ; Lallier *et al.*, 2010b ; Lallier *et al.*, 2009). Par ailleurs, dans les deux cas, le lien avec la lecture pourrait davantage dépendre des déficits observés en modalité auditive qu'en modalité visuelle (Lallier *et al.*, 2010a ; Lallier *et al.*, 2013).

Nous nous concentrerons ici sur les déficits qui intéressent la modalité visuelle et qui ont un impact sur l'apprentissage de la lecture, indépendamment de tout dysfonctionnement en modalité auditive. Pour mieux comprendre leur nature, je commencerai par présenter un modèle qui décrit les mécanismes « visuels » à l'œuvre dans le traitement des mots écrits. Nous verrons que plusieurs phénomènes, liés aux caractéristiques des lettres et au fonctionnement du système visuel, altèrent le traitement des lettres dans les mots. Le modèle conduira à préciser le rôle de l'attention visuelle dans l'identification des lettres et la reconnaissance rapide des mots. Nous nous concentrerons ensuite sur la notion d'empan VA (Valdois, 2022) et sur les nombreuses données qui témoignent d'un déficit de l'empan VA en contexte dyslexique et, plus largement, du rôle de l'attention visuelle dans l'apprentissage de la lecture. Nous verrons que les études longitudinales et interventionnelles actuellement disponibles suggèrent l'existence d'une relation

causale entre niveau d'empan VA et niveau de lecture. La dernière partie conduira à s'interroger sur l'existence d'un sous-type de dyslexie ayant pour origine un déficit de l'empan VA. Cela nous amènera à préciser quelles sont les conditions à remplir pour parler de formes distinctes (ou sous-types) de dyslexies développementales et à montrer la spécificité des corrélats cérébraux de l'empan VA. Nous conclurons sur l'impact de ces recherches en pratique clinique et en éducation.

Traitements visuels et visuo-attentionnels impliqués en lecture

Plusieurs mécanismes « visuels » interviennent dans le traitement des lettres du mot lors de la lecture. Ces mécanismes sont décrits dans les modèles dits « de reconnaissance de mots ». Une revue de questions présentant les différents modèles de reconnaissance de mots (Phénix *et al.*, 2016) a permis de montrer une évolution dans la conception des mécanismes en jeu et des différences notables d'un modèle à l'autre, selon que la reconnaissance de mots est au centre de la préoccupation des chercheurs ou n'est qu'une étape de traitement dans le cadre de la lecture à haute voix de mots isolés ou de phrases. Globalement, ces études suggèrent l'implication de trois mécanismes : un *gradient d'acuité*, pris en compte dans les modèles de lecture de phrases ; des *interférences latérales*, surtout postulées dans les modèles de reconnaissance de mots isolés, et des *traitements VA*, implémentés dans les modèles de contrôle oculomoteur lors de la lecture de phrases. Néanmoins, jusqu'à récemment, aucun modèle ne prenait en compte l'ensemble de ces mécanismes et aucun n'explicitait leurs interactions.

Ce constat a conduit à proposer un nouveau modèle computationnel de reconnaissance de mots, le modèle BRAID pour *Bayesian model of word Recognition with Attention, Interference and Dynamics* (Ginestet *et al.*, 2016 ; Phénix, 2018 ; Valdois *et al.*, 2021a ; Bouma, 1970). Ce modèle (figure 6.1) postule l'existence de trois niveaux de traitement : sensoriel, perceptif et lexical.

Le niveau sensoriel correspond au traitement initial de la séquence du mot dans le but d'identifier les lettres qui le composent. L'identification des lettres est affectée par deux mécanismes visuels, le gradient d'acuité et les interférences latérales.

Le niveau perceptif fonctionne comme une mémoire à court terme où se construit une représentation mentale de la séquence traitée. La qualité de cette représentation dépend de l'efficacité des traitements sensoriels qui transmettent plus ou moins d'informations sur l'identité des lettres du mot. Elle dépend également des traitements VA qui interviennent entre le niveau sensoriel et le niveau perceptif.

Le niveau lexical correspond aux connaissances sur la forme orthographique des mots qui ont été préalablement rencontrés. Les mots sont activés au niveau lexical en fonction de leur similarité avec les lettres identifiées au niveau perceptif. En retour, les activations lexicales interagissent avec le niveau perceptif, en renforçant les lettres qui correspondent à des mots existants.

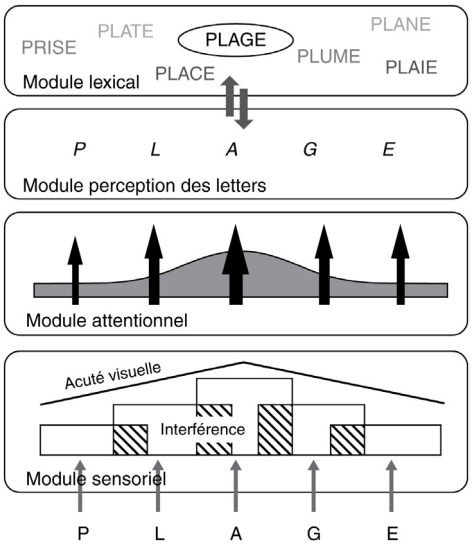

FIGURE 6.1. **Illustration des différentes étapes de traitement du mot PLAGE dans le cadre du modèle BRAID de reconnaissance de mots.**

Le processus de reconnaissance de mot est dynamique au cours de chaque fixation. En début de traitement, les informations recueillies sur l'identité des lettres ne sont pas très précises, conduisant à créer une représentation mentale perceptive sous-spécifiée (incomplète et/ou avec incertitude sur l'identité de certaines lettres). Une fixation plus longue (ou des fixations additionnelles) permet de recueillir davantage d'informations et de préciser la représentation mentale correspondante. Les connaissances lexicales sont en permanence activées sur la base des informations recueillies au niveau perceptif. Initialement, de nombreux mots sont compatibles avec les informations partielles du niveau perceptif mais progressivement la représentation perceptive se précise, ne devenant compatible qu'avec un mot unique qui sera alors reconnu.

Nous allons maintenant examiner plus en détail l'effet des traitements visuels et de l'attention visuelle sur la reconnaissance des mots.

Traitements visuels au niveau sensoriel

Globalement, un mot est reconnu plus ou moins efficacement selon la facilité avec laquelle les lettres qui le composent sont identifiées. Or, plusieurs phénomènes affectent l'identification des lettres au niveau sensoriel : la proximité visuelle entre lettres, le gradient d'acuité et les interférences latérales.

Proximité visuelle entre lettres. Une lettre (isolée ou dans la séquence d'un mot) est identifiée plus vite si elle se différencie plus nettement des autres lettres de l'alphabet. Plus la lettre ressemble à d'autres lettres avec lesquelles elle risque d'être confondue, plus son traitement prend du temps. Ainsi, les lettres du mot PLAGE qui renferment beaucoup de traits visuels (lignes, segments, courbes…)

communs avec d'autres lettres de l'alphabet sont plus difficiles à distinguer ; c'est le cas, par exemple, du G qui est visuellement proche d'un C, alors que le A se différencie assez nettement des autres lettres, sous le format présenté. Le modèle renferme une matrice de confusion (non représentée sur la figure 6.1) qui permet de prendre en compte la proximité visuelle entre lettres.

Gradient d'acuité. La visibilité des lettres est affectée par le gradient d'acuité. L'acuité est maximale au niveau de la lettre fixée (ici, le A du mot PLAGE), mais diminue progressivement plus la distance entre la lettre et le point de fixation augmente. Ainsi, la baisse d'acuité visuelle affecte davantage la visibilité des lettres P et E que celle des lettres L ou G dans le mot PLAGE. La baisse d'acuité en fonction de la distance au point de fixation est une caractéristique de notre système visuel. Les dyslexiques ne souffrent pas d'une baisse anormale d'acuité visuelle, comme je le rappelais précédemment. On vérifie que la vision de l'enfant est normale ou corrigée avant de poser un diagnostic de dyslexie développementale.

Interférences latérales. Les interférences entre lettres voisines sont un autre phénomène qui intervient au niveau sensoriel et affecte la visibilité des lettres du mot. On sait depuis longtemps qu'identifier un objet, quel qu'il soit, est plus difficile lorsqu'il est à proximité d'objets similaires (Bouma, 1970 ; Pelli & Tillman, 2008). Ce phénomène est particulièrement délétère en lecture. Un mot est constitué de lettres entourées d'autres lettres mais les mots sont entourés de mots dans les phrases et les textes sont eux-mêmes constitués de phrases entourées d'autres phrases.

À l'intérieur du mot, toutes les lettres ne sont pas également affectées par les interférences latérales. Ainsi, les lettres du mot PLAGE qui sont entourées de deux lettres souffrent d'une double interférence qui diminue d'autant leur visibilité ; c'est le cas de toutes les lettres internes au mot (L, A et G dans l'exemple). Par contre, les lettres initiales et finales ne subissent d'interférence que de la lettre qui les suit ou les précède immédiatement. L'identification de ces lettres (P et E, dans l'exemple) est donc plus facile que celle des lettres internes au mot.

Tout lecteur est soumis au phénomène d'interférence latérale, puisque c'est une caractéristique de notre système visuel. Mais ce phénomène est plus marqué en contexte dyslexique. Bien que ce ne soit pas systématiquement observé chez tous les enfants, plusieurs études montrent des effets excessifs d'interférence latérale dans la population dyslexique (Martelli *et al.*, 2009 ; Bouma & Legein, 1977 ; Callens *et al.*, 2013). On peut facilement imaginer que la présence d'interférences latérales excessives nuise à l'identification des lettres et des mots. Néanmoins, cela ne représente pas un problème majeur, dans la mesure où il est relativement facile de pallier cet excès d'interférences. Les interférences latérales sont dues à la présence d'éléments similaires proches les uns des autres. On peut donc réduire les interférences en augmentant la distance entre ces éléments. On a notamment montré que les personnes dyslexiques lisent plus facilement les mots (avec moins d'erreurs et plus rapidement) lorsque l'espacement entre les lettres est légèrement augmenté (Spinelli *et al.*, 2002 ; Martelli *et al.*, 2009).

De la même façon, la lecture de texte est améliorée lorsque l'espacement est augmenté entre les lettres du mot, entre les mots de la phrase et entre les phrases du texte (Zorzi *et al.*, 2012). Espacer légèrement les lettres donne également un avantage aux lecteurs tout-venant qui gagnent en vitesse de lecture sous cette condition (Martelli *et al.*, 2009). Il faut noter toutefois qu'aucun espacement n'est idéal pour tous les lecteurs. Par ailleurs, un espacement trop grand nuit à la vitesse de lecture au lieu de l'améliorer. Il faut donc évaluer pour chaque enfant quel est l'espacement qui lui convient et lui permet de lire plus vite et en faisant moins d'erreurs.

On peut également remarquer que certains comportements spontanés du lecteur, comme le fait de suivre la ligne du doigt, ont également pour effet de réduire les interférences latérales et de concentrer l'attention sur le mot à lire. Certaines méthodes ont les mêmes conséquences : par exemple, l'utilisation d'une feuille blanche masquant les phrases qui suivent dans le texte, ou l'utilisation de caches ne dévoilant qu'une phrase du texte ou un seul mot dans la phrase.

Attention visuelle et reconnaissance de mots

On sait que l'attention visuelle est indispensable à la lecture de phrases. C'est l'attention qui sélectionne le mot à lire dans la phrase et guide les mouvements oculaires en lecture. Le rôle de l'attention visuelle dans le contrôle des déplacements oculomoteurs est unanimement reconnu, si bien que l'attention visuelle est un composant nécessaire des modèles de contrôle oculomoteur en lecture de phrases (Engbert *et al.*, 2005 ; Reichle *et al.*, 2009 ; Snell *et al.*, 2018).

L'attention visuelle est également impliquée dans la reconnaissance des mots, même isolés. On a longtemps pensé que le traitement des mots familiers était automatique et ne requérait pas d'attention. Il est à présent démontré que ce n'est pas le cas ; il n'y a pas de reconnaissance de mots, même courts et fréquents, sans attention visuelle (Besner *et al.*, 2016 ; Lachter *et al.*, 2004 ; Lien *et al.*, 2010 ; Waechter *et al.*, 2011). L'attention visuelle a pour fonction de faciliter l'identification des lettres des mots sur lesquels elle se déploie (Carrasco, 2011 ; Meyer *et al.*, 2018). Son rôle est fondamental dans la reconnaissance du mot puisque l'attention peut en partie, voire totalement, compenser les effets délétères de l'acuité visuelle et des interférences latérales.

Le déploiement attentionnel n'est pas uniforme sur l'ensemble des lettres du mot : toutes les lettres ne bénéficient pas des mêmes ressources attentionnelles. Le déploiement de l'attention sur le mot PLAGE est illustré dans la figure 6.1. Il est représenté par la surface colorée au sein du module attentionnel. On voit que l'attention visuelle s'étend sur toute la longueur du mot mais davantage de ressources attentionnelles (hauteur de la courbe) sont allouées aux lettres centrales. Les lettres qui reçoivent plus d'attention transmettent des informations plus précises sur leur identité au niveau perceptif (ce qui est représenté par des flèches noires plus épaisses sur la figure 6.1). Elles contribuent à la création d'une représentation mentale plus fidèle, facilitant ainsi la reconnaissance du mot.

La figure 6.1 offre une image statique de la répartition attentionnelle mais le propre de l'attention visuelle est d'être éminemment flexible et de s'adapter en permanence aux contraintes de la tâche. En ce sens, le statut de l'attention visuelle diffère fondamentalement de celui de l'acuité visuelle ou des interférences latérales. Les effets de ces deux phénomènes sont déterminés par les propriétés physiques du stimulus et ne peuvent être modulés par le système cognitif. Au contraire, la quantité de ressources attentionnelles disponible au cours du traitement et la façon dont l'attention se répartit sur le mot à lire dépendent fortement des capacités cognitives du lecteur. L'attention visuelle est donc un mécanisme cognitif au service de la lecture.

Comment mesurer les capacités VA du lecteur ? Il est extrêmement difficile d'obtenir une mesure directe et fiable des capacités VA que le lecteur mobilise lors de la lecture (Bundesen, 1990). Par contre, il est assez facile d'obtenir une mesure indirecte des capacités d'attention visuelle. La quantité d'attention visuelle qui est déployée sur un ensemble d'éléments visuels à chaque fixation détermine le nombre d'éléments qui seront traités dans cet ensemble. Donc, une mesure du nombre d'éléments reconnus permet une estimation des capacités attentionnelles mobilisées. Cette mesure correspond à l'empan VA.

Empan visuo-attentionnel, lecture et dyslexie

Mesure et interprétation de l'empan visuo-attentionnel

On utilise classiquement des épreuves de report global et partiel de lettres pour mesurer l'empan VA (figure 6.2). Dans ces épreuves[2], une séquence de consonnes est présentée à l'écran pendant un temps bref (durée d'affichage ≤ 200 ms). On demande ensuite à l'enfant de dénommer soit l'ensemble des lettres de la séquence (condition de report global), soit une seule lettre dont la position est indiquée par une barre qui apparaît à l'écran immédiatement après disparition de la séquence (condition de report partiel).

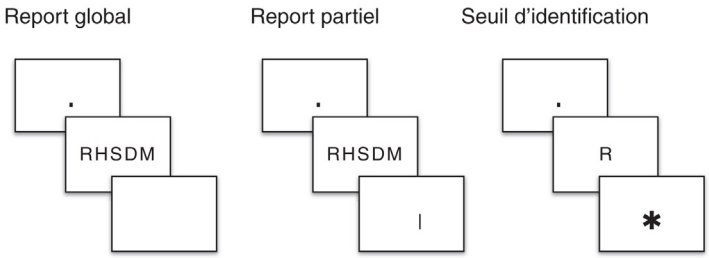

FIGURE 6.2. **Épreuves de report global et partiel de lettres pour évaluer l'empan VA et épreuve contrôle de seuil d'identification.**

2. Les épreuves sont disponibles pour les cliniciens à l'adresse suivante : https://www.happy-neuronpro.com/orthophonie/espace-evaluation/evadys/

Les scores obtenus sur les épreuves de report global et partiel permettent d'évaluer les capacités d'empan VA des enfants. On ne peut cependant poser un diagnostic de déficit de l'empan VA sur la seule base des résultats, même très faibles, sur ces épreuves. Une épreuve contrôle de seuil d'identification de lettre (voir figure 6.2) doit systématiquement être proposée afin de s'assurer que de faibles performances sur les épreuves de report ne sont pas la simple conséquence d'un déficit d'identification des lettres isolées. On ne parle de déficit de l'empan VA que dans le cas où les épreuves de report sont massivement échouées malgré des capacités préservées d'identification rapide des lettres isolées.

Les épreuves de report sont adaptées à l'âge des patients en modulant le nombre de stimuli à traiter. Les épreuves destinées aux pré-lecteurs sont limitées à quatre items et des séquences de chiffres (comme 4 7 1 9) sont plus volontiers utilisées que des séquences de lettres ; le traitement de cinq items est adapté aux enfants scolarisés en primaire, mais des séquences de six items peuvent être utilisées pour les collégiens et les adultes (Valdois *et al.*, 2017). La taille de l'empan VA augmente de la maternelle à l'âge adulte mais ne dépasse pas, dans le meilleur des cas, quatre ou cinq items correctement identifiés en une fixation unique.

Les résultats sur les épreuves de report global et partiel, en l'absence de déficit de l'identification des lettres isolées, sont directement interprétables comme une estimation des capacités d'attention visuelle mobilisées au cours du traitement (Valdois, 2022). Des scores déficitaires sur ces épreuves ne peuvent en aucun cas être attribués à un effet excessif d'interférences latérales puisque l'espacement entre les lettres est augmenté au sein des séquences. Plusieurs études montrent par ailleurs que les capacités d'évocation orale du nom des lettres ou de maintien en mémoire verbale de l'information affectent peu, voire pas, l'estimation de l'empan VA (De Jong & Van den Boer, 2021 ; Lassus-Sangosse *et al.*, 2008 ; Valdois *et al.*, 2012). D'ailleurs, des estimations comparables sont obtenues que les épreuves utilisées soient verbales ou non verbales, et que les stimuli présentés soient des lettres, des chiffres ou des stimuli non familiers (Chan & Yeung, 2020 ; Lobier *et al.*, 2012) ; pour une revue de questions, voir Valdois (2022). On sait à présent qu'un déficit de l'empan VA traduit un déficit du système attentionnel endogène (Valdois *et al.*, 2019a).

Déficit de l'empan VA en contexte dyslexique

Une méta-analyse récente (Liu *et al.*, 2023) portant sur 25 études et plus de 850 participants, conclut à un déficit de l'empan VA dans la population dyslexique.

Les capacités d'empan VA des enfants dyslexiques prédisent leur niveau de lecture (Perry & Long, 2022). Plusieurs études ont montré qu'un déficit de l'empan VA altérait la vitesse et le score de lecture que les items présentés soient des mots (réguliers ou irréguliers) ou des pseudo-mots (Bosse *et al.*, 2007 ; Zoubrinetzky *et al.*, 2014 ; Zoubrinetzky *et al.*, 2016). Un empan VA réduit a notamment un impact sur la lecture des mots irréguliers puisqu'une lecture correcte de ces mots nécessite de traiter simultanément l'ensemble des lettres

qui les composent (ex. : « monsieur » et pas « mon » - « si » - « eur »). Mais un déficit de l'empan VA peut avoir des conséquences au-delà de la lecture des mots irréguliers (Valdois *et al.*, 2004), notamment dans une langue comme le français, où les unités orthographiques sous-lexicales sont le plus souvent composées d'un grand nombre de lettres, qu'il s'agisse de syllabes (ex. : prin-temps) ou de graphèmes (ex. : p-eau ; pa-ille ; ét-aient). Le traitement simultané des lettres de ces unités est altéré lorsque la réduction de l'empan VA est sévère, et des erreurs de segmentation (ex. : « teau » lu /te/-/o/), sont alors observées (Zoubrinetzky *et al.*, 2014). Une réduction de l'empan VA s'accompagne quasi systématiquement d'une augmentation du temps de lecture, qui est d'autant plus forte que le mot est plus long (Valdois *et al.*, 2011 ; Valdois *et al.*, 2003). La lecture de phrases et de texte est également perturbée et toujours ralentie (Chen *et al.*, 2019 ; Germano *et al.*, 2014 ; Prado *et al.*, 2007 ; Valdois *et al.*, 2021b).

Plusieurs études de cas ont décrit des déficits en orthographe lexicale chez des enfants qui présentaient un déficit de l'empan VA (Valdois *et al.*, 2011 ; Valdois *et al.*, 2003 ; Bouvier-Chaverot *et al.*, 2012). En général, ces enfants présentent de meilleures performances en dictée de pseudo-mots qu'en dictée de mots inconsistants (Zoubrinetzky *et al.*, 2014). Ils écrivent les mots sur la base de leur décomposition phonémique, ce qui peut conduire à écrire le mot comme il se prononce (ex. : « acoiriome » pour « aquarium »). Mais, dans bien des cas, la production écrite ne tient pas compte du contexte, si bien que le mot écrit ne se prononce pas comme le mot dicté même s'il témoigne de bonnes capacités de décomposition phonémique, comme pour « cirque » écrit « sirce » ou « gentil » écrit « ganti ». En effet, une décomposition phonémique correcte du mot /siʁk/ aboutira à isoler le phonème /k/. Il est ici associé à la lettre « c », ce qui est parfaitement correct en français, mais évidemment pas dans ce contexte. De la même façon, le phonème /ã/ peut à juste titre être orthographié « an » dans « gentil » si l'on ne tient pas compte du contexte. On remarquera que la prise en compte du contexte implique de traiter plusieurs lettres simultanément, ce qui est précisément perturbé chez les enfants avec déficit de l'empan VA.

Par ailleurs, même lorsqu'elles sont phonologiquement correctes, les productions orthographiques sont souvent atypiques lors d'un déficit de l'empan VA. On observe notamment une proportion anormalement élevée de séquences illégales (comme « ariqo », « quulbute », ou « miroirr ») et de formes orthographiques atypiques (comme « geamè » ou « piai ») lors de l'écriture sous-dictée de mots (Zoubrinetzky *et al.*, 2014). Certaines de ces erreurs semblent résulter de l'application de conversions phonème–graphème sans prise en compte du contexte, mais elles montrent également que ces enfants n'ont aucune connaissance du fait que certaines associations sont plus fréquentes que d'autres en français.

La question qui a essentiellement retenu l'attention des chercheurs a été de déterminer si le déficit de l'empan VA était le plus souvent observé en association avec les déficits phonologiques classiquement décrits chez les enfants dyslexiques ou si, au contraire, ces deux types de déficits étaient le plus souvent dissociés. La figure 6.3 illustre les résultats de sept études qui se sont penchées sur cette question.

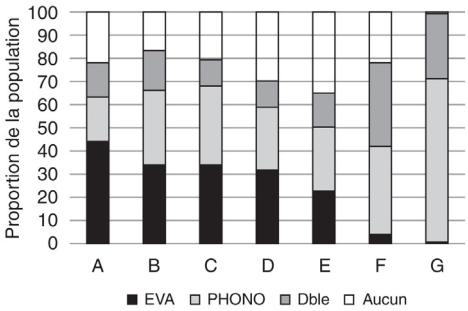

FIGURE 6.3. **Proportion de la population dyslexique présentant un déficit isolé de l'empan VA (EVA), un déficit phonologique isolé (PHONO), les deux types de déficit (Dble) ou aucun des deux.**
Étude A, 68 enfants, et étude B, 29 enfants, données tirées de Bosse *et al.* (2007) ; étude C, 71 enfants (Zoubrinetzky *et al.*, 2014) ; étude D, 63 enfants (Zoubrinetzky *et al.*, 2016) ; étude E, 162 enfants (Valdois *et al.*, 2021b) ; étude F, 45 enfants (Cheng *et al.*, 2021) ; étude G, 164 enfants (Saksida *et al.*, 2016).

Il ressort de ces études (voir figure 6.3) que la proportion d'enfants présentant soit un déficit isolé, phonologique ou de l'empan VA, soit un double déficit est très variable d'une étude à l'autre. On peut néanmoins remarquer que les résultats des études de Cheng *et al.* (2021) et Saksida *et al.* (2016), respectivement F et G sur la figure, se distinguent assez nettement des autres. Ces deux études concluent à la quasi-inexistence de trouble isolé de l'empan VA alors que, dans toutes les autres, 23 % à 44 % de la population présente un déficit unique de l'empan VA. Une autre particularité de ces deux études est de conclure à une assez forte proportion de double déficit dans la population dyslexique (36 % et 28 % respectivement), alors que cette proportion varie entre 10 et 17 % dans les autres études.

Enfin, la proportion d'enfants présentant un déficit phonologique isolé est exagérément élevée dans la dernière étude (Saksida *et al.*, 2016), comparativement à toutes les autres. Différents facteurs sont sans doute à invoquer pour rendre compte de cette variabilité. En particulier, les études F (Cheng *et al.*, 2021) et G (Saksida *et al.*, 2016) ont fait un choix méthodologique commun qui n'a pas été fait dans les autres études. Le terme de déficit phonologique dans ces études renvoie soit à un déficit de la conscience phonémique, soit à un déficit de la dénomination rapide, soit à leur combinaison, alors que dans toutes les autres études, ce terme renvoie exclusivement à un déficit de conscience phonémique. Il est donc possible de conclure que déficit de l'empan VA et déficit de conscience phonémique sont le plus souvent dissociés dans la population dyslexique.

Empan VA et apprentissage de la lecture

Plus largement, le lien entre empan VA et apprentissage de la lecture est également démontré, hors contexte dyslexique. Les études menées chez les normolecteurs montrent clairement que ce lien est indépendant des compétences

phonologiques des enfants. Par ailleurs, il apparaît de plus en plus clairement que l'empan VA influe non seulement sur le niveau de lecture mais également sur le niveau d'orthographe. En fait, l'empan VA module l'apprentissage orthographique des mots nouveaux (c'est-à-dire la capacité à se former une représentation mentale de la forme des mots que l'on rencontre en lecture) avec des conséquences à la fois en lecture et en orthographe lexicale.

L'empan VA est un prédicteur de l'apprentissage de la lecture. De nombreuses études montrent que le niveau d'empan VA prédit le niveau de lecture aussi bien en primaire qu'au secondaire ou même chez l'adulte (Antzaka *et al.*, 2017 ; Bosse & Valdois, 2009 ; Huang *et al.*, 2019 ; Lobier *et al.*, 2013 ; Van den Boer *et al.*, 2013 ; Van den Boer & De Jong, 2018). Le lien avec la lecture est indépendant des autres aptitudes connues pour influencer l'apprentissage de la lecture qu'il s'agisse du niveau intellectuel, des capacités phonologiques, de la connaissance du nom des lettres, ou autre. On peut donc en conclure que l'apprentissage de la lecture est facilité chez les enfants qui ont des capacités d'empan VA plus élevées. Bien sûr, l'empan VA n'est qu'une des dimensions prédictives de la lecture. Un enfant peut avoir un très bon niveau d'empan VA et rencontrer des difficultés d'apprentissage de la lecture, s'il présente par exemple une conscience phonémique peu développée.

Chez les enfants tout-venant, l'empan VA est notamment relié à la vitesse de lecture (Bosse & Valdois, 2009, Van den Boer & De Jong, 2018). Un empan VA élevé permet d'identifier rapidement davantage de lettres dans le mot, ce qui permet de le reconnaître plus vite. Cette relation apparaît clairement dans les études qui mesurent les mouvements oculaires pendant la lecture. Les adultes normo-lecteurs qui ont des capacités d'empan VA plus faibles font davantage de fixations en lecture de mots et identifient moins de lettres à chaque fixation (Antzaka *et al.*, 2017 ; Ginestet *et al.*, 2020). La même relation est observée lors de la lecture de textes chez les enfants dyslexiques avec déficit de l'empan VA (Prado *et al.*, 2007). Le fait d'identifier moins de lettres à chaque fixation conduit à des effets de longueur plus marqués. Plus l'empan VA est faible, plus la lecture sera ralentie lorsque la longueur du mot augmente. Un impact de l'empan VA sur l'effet de longueur a été clairement décrit chez les normo-lecteurs (Van den Boer *et al.*, 2013).

L'impact de l'empan VA sur la lecture est donc largement établi, mais le lien entre empan VA et connaissances orthographiques a été plus rarement exploré. Van den Boer *et al.* (2015) ont mesuré l'empan VA chez des enfants à qui ils ont proposé deux types de tâches orthographiques : écrire des mots sous dictée et reconnaître l'orthographe d'un mot parmi des pseudo-homophones (mots inventés ayant la même prononciation). Ils montrent que les enfants qui ont un meilleur niveau d'empan VA ont un meilleur score dans ces deux épreuves ; ils ont donc de meilleures connaissances en orthographe lexicale. Dans une étude plus récente, Niolaki *et al.* (2021) montrent que l'empan VA est un des prédicteurs du niveau d'orthographe lexicale en début d'apprentissage, au même titre que les compétences phonologiques, mais que seul l'empan VA prédit le niveau d'orthographe lexicale à un âge plus avancé.

Pourquoi observe-t-on un lien entre empan VA, apprentissage de la lecture et connaissances en orthographe lexicale ? L'étude de Marinelli *et al.* (2020) peut nous aider à répondre à cette question. Les auteurs ont étudié les capacités d'apprentissage orthographique d'enfants italiens et anglais de primaire. La tâche consistait à apprendre des mots nouveaux associés à des dessins. Le dessin d'un animal imaginaire était par exemple associé au mot « *flicatta* » en italien et au mot « *grollen* » en anglais. En phase initiale, on présentait le dessin associé au mot écrit et on demandait à l'enfant de recopier le mot. Ensuite, le dessin seul était présenté et l'enfant devait écrire de mémoire le mot correspondant. La bonne orthographe du mot était ensuite dévoilée et l'enfant recopiait à nouveau le mot en cas d'erreur. Les auteurs montrent que l'apprentissage est facilité chez les enfants qui ont un meilleur niveau d'empan VA, mais cela n'est vrai que pour l'anglais, pas pour l'italien. L'empan VA semble donc contribuer à l'apprentissage orthographique de mots nouveaux, notamment dans les langues qui se caractérisent par des unités orthographiques (graphème et syllabe) longues.

Un empan VA plus élevé permettrait de créer une représentation mentale orthographique plus précise du mot (Ginestet *et al.*, 2022). Or, on sait que la lecture d'un mot est facilitée (et qu'elle est notamment plus rapide) lorsque le mot est connu et a été préalablement mémorisé. Si les mêmes connaissances orthographiques sont mobilisées en lecture et en orthographe, alors une représentation mentale plus précise devrait également faciliter l'écriture sous dictée du mot.

La relation entre empan VA et apprentissage de la lecture est-elle de nature causale ?

Il est assez clairement établi qu'un lien existe entre empan VA et apprentissage de la lecture. On sait également que certains enfants dyslexiques présentent un déficit unique de l'empan VA sans atteinte des autres fonctions liées à l'apprentissage de la lecture. La question critique est donc de savoir si la relation entre empan VA et apprentissage de la lecture est de nature causale. Autrement dit, est-on en droit de penser que c'est à cause d'un empan VA faible qu'apparaissent des difficultés de lecture et donc, qu'un déficit de l'empan VA est à l'origine de certaines formes de dyslexies développementales ?

L'existence d'un déficit de l'empan VA, même isolé, dans le contexte de dyslexie ne nous informe pas sur le sens de la relation. L'empan VA peut être à l'origine du déficit de lecture mais inversement, il se pourrait que ce soit le déficit en lecture qui entraîne un déficit de l'empan VA. On parle de relation causale dans le premier cas, mais de relation de conséquence dans le second.

Arguments contre un lien de conséquence

L'hypothèse d'un lien de conséquence a été évoquée pour rendre compte de l'association entre déficit de l'empan VA et déficit de lecture (Goswami, 2015).

Mais, en fait, de nombreuses données comportementales vont à l'encontre de cette hypothèse (Lobier & Valdois, 2015). En particulier, une relation de conséquence prédirait que tout enfant dyslexique présente nécessairement un déficit de l'empan VA. Ceci a été discuté précédemment et n'est absolument pas conforme aux données (figure 6.3). Par ailleurs, le niveau d'empan VA devrait être similaire chez tous les enfants qui ont le même niveau de lecture. Cela ne se vérifie pas non plus. La comparaison d'enfants dyslexiques avec déficit de l'empan VA et d'enfants plus jeunes de même niveau de lecture montre que l'empan VA diffère significativement entre les deux populations (Zoubrinetzky *et al.*, 2014 ; Bosse & Valdois, 2003).

Dans leur étude, Zoubrinetzky *et al.* (2014) ont comparé l'empan VA dans trois groupes appariés en niveau de lecture : un groupe d'enfants dyslexiques avec déficit de l'empan VA, un groupe d'enfants dyslexiques avec déficit phonologique et un groupe d'enfants normo-lecteurs plus jeunes. Ils ont également testé un groupe d'enfants normo-lecteurs d'âge chronologique comparable à celui des groupes dyslexiques. Les résultats sont présentés dans la figure 6.4. L'étude montre que les enfants dyslexiques sans déficit phonologique mais avec déficit de l'empan VA (groupe EVA) ont un niveau d'empan VA inférieur à celui des trois autres groupes. Leur empan VA est notamment plus faible que celui des deux autres groupes de même niveau de lecture, le groupe d'enfants normo-lecteurs plus jeunes (CNL) et le groupe d'enfants dyslexiques avec déficit phonologique (Phono).

Un autre résultat qui va à l'encontre d'une relation de conséquence est le fait que le groupe d'enfants dyslexiques avec déficit phonologique a un niveau

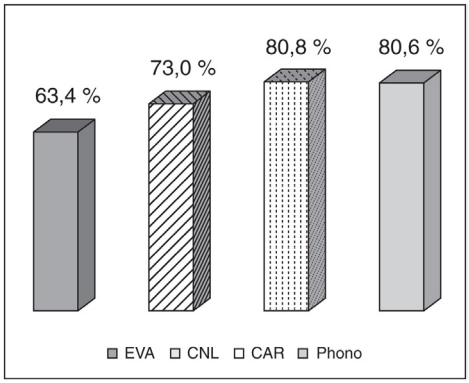

FIGURE 6.4. **Comparaison des scores (%) d'empan VA chez des populations dyslexiques et contrôles.**
Les deux groupes d'enfants dyslexiques sont appariés en âge ; l'un des deux présente un déficit phonologique (Phono) alors que l'autre a des compétences phonologiques préservées mais un déficit de l'empan VA (EVA).Un des groupes contrôles (CNL) correspond à des enfants normo-lecteurs plus jeunes appariés en niveau de lecture avec les groupes dyslexiques ; l'autre (CAR) est apparié en âge chronologique et correspond à des enfants dont le niveau de lecture est plus élevé que dans les trois autres groupes. Données tirées de Zoubrinetzky *et al.* (2014).

d'empan VA tout à fait comparable à celui des enfants normo-lecteurs de même âge réel. Donc ce n'est pas la présence d'un déficit en lecture qui affecte le niveau d'empan VA.

Arguments à l'appui d'un lien causal

Éliminer l'hypothèse d'une relation de conséquence ne suffit pas à démontrer qu'il y a causalité. Il est généralement admis (Goswami, 2015) que deux types d'études, les études longitudinales et les études d'entraînement, sont particulièrement pertinentes pour tester la causalité.

Concernant les études longitudinales, assez peu ont été menées à ce jour. Ces études consistent à mesurer l'empan VA chez un groupe d'enfants en début de scolarité et à vérifier si cette mesure prédit leur niveau de lecture un an, ou quelques années, plus tard. Dans l'idéal, le niveau d'empan VA devrait être estimé avant même le début de l'apprentissage de la lecture, afin de s'assurer qu'il n'est pas affecté par le niveau de lecture de l'enfant. Une seule étude longitudinale répond à ce critère (Valdois *et al.*, 2019b). Dans cette étude, Valdois *et al.* (2019b) ont mesuré les capacités d'empan VA chez des enfants qui étaient scolarisés en fin de grande section de maternelle. Le niveau de lecture de ces mêmes enfants a été évalué l'année suivante, en fin de CP. De nombreuses autres aptitudes, connues pour influencer l'apprentissage de la lecture, étaient également mesurées chez les enfants pré-lecteurs (niveau intellectuel, connaissance des lettres, conscience phonologique, mémoire verbale). On vérifiait également que les enfants n'étaient pas capables de lire des mots familiers, même courts et fréquents, en fin de grande section. Les résultats montrent que l'empan VA mesuré en fin de grande section prédit le niveau de lecture en fin de CP, indépendamment des autres aptitudes de l'enfant. En fait, les enfants qui ont un niveau d'empan VA élevé avant le début de l'apprentissage de la lecture apprennent à lire plus facilement. Ce résultat est en faveur de l'hypothèse de causalité.

Les études d'entraînement sont particulièrement importantes pour attester d'une relation de causalité. Elles consistent à entraîner le processus déficitaire et à vérifier que l'entraînement améliore le niveau de lecture des enfants. Il faut évidemment s'assurer que l'entraînement porte exclusivement sur le processus déficitaire, ici l'empan VA, sans inclure d'activité de lecture. Plusieurs études d'entraînement ont été réalisées et toutes démontrent qu'un entraînement de l'empan VA conduit à une amélioration du niveau de lecture (Valdois *et al.*, 2014 ; Zoubrinetzky *et al.*, 2019 ; Valdois & Zoubrinetzky, 2022 ; Zhao *et al.*, 2019).

Prenons, comme exemple, l'étude de Zoubrinetzky *et al.* (2019). Cette étude a été menée auprès de 45 enfants dyslexiques qui ont utilisé deux types de logiciels : un logiciel d'entraînement de l'empan VA (MAEVA©) et un logiciel d'entraînement de la perception catégorielle (RAPDYS©)[3]. La moitié des enfants commençaient par utiliser MAEVA© en phase 1 puis passaient à l'entraînement

3. MAEVA© et RAPDYS© sont distribués par la société Happy Neuron (Humans Matter), Lyon.

RAPDYS© en phase 2. On dénommera ce groupe le groupe MAEVA©-RAPDYS©. L'autre moitié commençait par RAPDYS© en phase 1 avant de passer à MAEVA©, on parlera du groupe RAPDYS©-MAEVA©. Les durées d'entraînement avec les deux logiciels étaient strictement identiques. Elles s'étalaient sur 6 semaines à raison de 15 minutes par jour, 5 jours par semaine.

L'effet des entraînements sur les performances d'empan VA et de lecture de mots irréguliers est présenté dans la figure 6.5 pour les deux groupes. En phase 1 (entre le prétest et le post-test 1), le niveau d'empan VA évolue plus fortement dans le groupe MAEVA©-RAPDYS© (en noir sur la figure 6.5) que dans le groupe RAPDYS©-MAEVA© (en grisé). On a donc une nette amélioration de l'empan VA suite à l'entraînement MAEVA©, alors que la performance reste largement inchangée dans le groupe qui s'est entraîné avec RAPDYS©. En phase 2 (comparaison entre le post-test 1 et le post-test 2), les effets s'inversent lors du changement de logiciel dans les deux groupes. Les enfants du groupe RAPDYS©-MAEVA© utilisent MAEVA© durant cette phase et cela se traduit par une progression de l'empan VA nettement plus forte que dans l'autre groupe, qui utilise à présent RAPDYS©. On a donc dans les deux groupes une amélioration de l'empan VA suite à l'entraînement avec MAEVA©.

Les résultats sont du même ordre pour ce qui concerne la lecture de mots irréguliers, évaluée ici en nombre de mots correctement lus par minute. En phase 1, le score de lecture augmente significativement suite à l'entraînement MAEVA©, alors qu'il stagne dans le groupe qui s'est entraîné avec RAPDYS©. Les tendances s'inversent lors du changement de logiciel en phase 2. À présent, ce sont les enfants du groupe RAPDYS©-MAEVA© (en grisé sur la figure 6.5) qui montrent la plus forte évolution des scores de lecture. Leur niveau de lecture est amélioré suite à l'entraînement MAEVA©. Globalement, l'entraînement

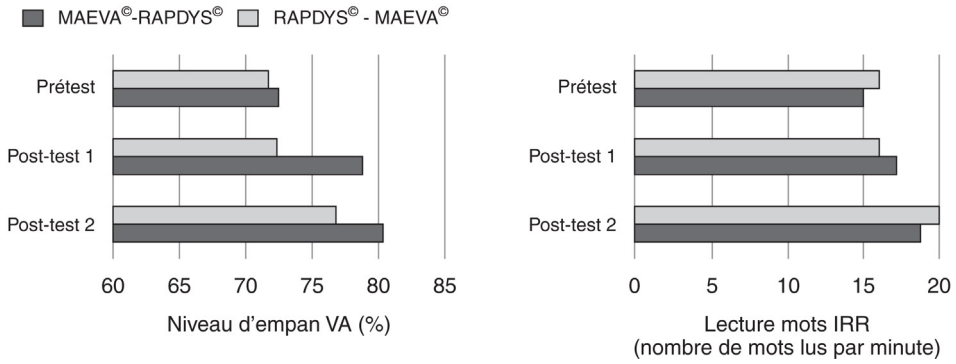

FIGURE 6.5. Amélioration du niveau d'empan VA et du nombre de mots irréguliers correctement lus par minute suite aux entraînements MAEVA© et RAPDYS©.
L'évolution en phase 1 est estimée en comparant les performances entre le prétest (avant tout entraînement) et le post-test 1 (suite à l'entraînement MAEVA© dans le groupe MAEVA©-RAPDYS© et suite à l'entraînement RAPDYS© dans le groupe RAPDYS©-MAEVA©). L'évolution est estimée en phase 2 en comparant les performances entre les post-tests 1 et 2 (suite à l'utilisation de l'autre logiciel, RAPDYS© ou MAEVA© selon le groupe). Mots IRR : mots irréguliers. Données tirées de Zoubrinetzky *et al.* (2019).

MAEVA© a deux effets concurrents : il permet d'améliorer à la fois l'empan VA et le niveau de lecture des enfants.

En conclusion, les études longitudinales et d'entraînement menées jusqu'ici apportent des arguments forts en faveur d'une relation causale entre empan VA et apprentissage de la lecture.

Un sous-type de dyslexies par déficit de l'empan VA

L'ensemble des données résumées précédemment suggère que certaines formes de dyslexies sont associées à un déficit de l'empan VA et qu'il existe un lien de nature causale entre le degré de sévérité de ce déficit et le niveau de lecture (voire d'orthographe) des enfants. Un déficit de l'empan VA semble donc responsable de certaines formes de dyslexies développementales alors que d'autres formes de dyslexies seraient plutôt associées à un déficit phonologique. Dans quelle mesure peut-on en conclure qu'il existe une forme de dyslexie par déficit de l'empan VA ?

Comment établir l'existence de sous-types de dyslexies ?

De très nombreux sous-types de dyslexies développementales ont été décrits. Les plus connus sont les dyslexies dites phonologiques et de surface qui se caractérisent par un déficit qui touche spécifiquement soit la lecture des pseudo-mots, soit la lecture des mots irréguliers (Peterson *et al.*, 2013). Ce type de classification se fonde donc sur les profils de lecture ; d'autres classifications sont fondées sur les types d'erreurs observés lorsque les patients lisent, ce qui peut conduire à identifier des dizaines de sous-types distincts, parfois postulés à partir de l'observation de différences subtiles. Par exemple, Friedmann et Coltheart (2016) proposent de distinguer une forme de dyslexie, appelée « *letter position dyslexia* », caractérisée par des migrations de lettres à l'intérieur du mot (par exemple, « *cloud* » lu « *could* », en anglais), d'une autre forme appelée dyslexie attentionnelle dans laquelle les erreurs de migration sont observées entre mots (par exemple, « *light fate* » produit « *fight late* »).

Les classifications fondées sur les profils de lecture ou les types d'erreurs ne sont pas sans poser de problèmes. Une classification en sous-types se justifie si les différents sous-types postulés se caractérisent par des déficits cognitifs distincts. Or, il a été démontré que des groupes d'enfants présentant des dyslexies soit phonologiques soit de surface pouvaient avoir le même déficit cognitif à des degrés de sévérité divers (Sprenger-Charolles *et al.*, 2000), que les performances d'un même enfant pouvaient correspondre à des sous-types différents au cours de son développement (Manis & Bailey, 2008) et que des enfants avec des déficits cognitifs différents pouvaient avoir des profils de lecture similaires (Zoubrinetzky *et al.*, 2014). De la même façon, un même type d'erreur peut s'observer suite à des déficits cognitifs différents et un déficit cognitif donné génère le plus souvent plusieurs types d'erreurs dont aucun n'est spécifique du déficit en question (Zoubrinetzky *et al.*, 2014 ; Toledano & Friedmann, 2023).

Si l'on admet que la dyslexie est un trouble neurocognitif, alors on ne peut postuler de formes de dyslexies distinctes que si ces formes se caractérisent par des déficits cognitifs différents associés au dysfonctionnement de régions cérébrales ou réseaux neuronaux eux-mêmes distincts. En fait, à peu près aucun des sous-types fondés sur les profils de lecture ou les types d'erreurs ne répond à cette exigence.

Existe-t-il des sous-types neurocognitifs distincts ?

Il est généralement admis qu'un déficit de la conscience phonémique est associé au dysfonctionnement de régions cérébrales qui sont situées autour de la scissure de Sylvius dans l'hémisphère gauche (Richlan, 2012). Cela pourrait donc caractériser une première forme de dyslexie par déficit phonologique. Nous avons montré précédemment qu'un déficit de l'empan VA est également décrit en contexte dyslexique et que ce déficit est indépendant des compétences phonologiques de l'enfant. Il pourrait donc caractériser une forme de dyslexie différente. Mais cela ne suffit pas pour postuler un sous-type distinct. Il faut pour cela démontrer que des corrélats cérébraux différents sont associés aux dyslexies par déficit phonologique et aux dyslexies par déficit de l'empan VA. Autrement dit, confirmer l'existence d'une forme de dyslexie par déficit de l'empan VA implique de démontrer que ce déficit est associé au dysfonctionnement de régions cérébrales autres que les aires périsylviennes gauches.

Plusieurs études ont permis d'identifier les corrélats cérébraux de l'empan VA. Certaines se sont focalisées sur les participants dyslexiques avec déficit de l'empan VA et ont comparé leur activité cérébrale à celles de normo-lecteurs dans des tâches impliquant le traitement simultané de plusieurs éléments visuels. Ces études menées en imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) montrent qu'un déficit de l'empan VA est associé à un dysfonctionnement des lobules pariétaux supérieurs qui semble plus marqué au sein de l'hémisphère gauche (Lobier *et al.*, 2014 ; Peyrin *et al.*, 2011 ; Reilhac *et al.*, 2013 ; Valdois *et al.*, 2014). Les lobules pariétaux supérieurs ne sont pas situés dans les régions périsylviennes gauches et ne sont pas classiquement associés aux activités langagières. C'est une région qui appartient au réseau attentionnel dorsal (Valdois *et al.*, 2019a ; Khan *et al.*, 2016). Il semble donc bien que les régions cérébrales impliquées dans l'empan VA diffèrent de celles qui sont associées au déficit phonologique, mais ces études ne suffisent pas à le démontrer.

Pour évaluer l'hypothèse de dissociation au niveau neuronal, il faut proposer des épreuves phonologiques et d'empan VA à tous les participants dyslexiques, qu'ils présentent un déficit phonologique ou de l'empan VA. Seulement deux études répondent à cette exigence. La première a comparé les activations cérébrales de deux jeunes adultes dyslexiques qui avaient le même niveau de lecture, mais le premier présentait un déficit phonologique en l'absence de déficit de l'empan VA alors que le second présentait le profil inverse, c'est-à-dire un déficit de l'empan VA sans déficit phonologique associé (Peyrin *et al.*, 2012). Les deux participants devaient effectuer sous IRMf une épreuve phonologique

de jugement de rimes et une épreuve de catégorisation d'éléments visuels multiples. L'analyse des activations cérébrales durant l'épreuve de jugement de rimes a montré une sous-activation des régions périsylviennes gauches (notamment gyrus temporal supérieur et gyrus supra-marginal) chez le participant avec trouble phonologique isolé. Les régions périsylviennes étaient normalement activées chez le participant dyslexique avec déficit de l'empan VA. Lorsque la tâche consistait à traiter des éléments visuels multiples, une sous-activation des lobules pariétaux supérieurs était observée chez le participant avec déficit de l'empan VA ; ces mêmes régions étaient activées normalement chez le participant avec déficit phonologique. Cette étude démontre que la double dissociation observée au niveau cognitif entre trouble phonologique et trouble de l'empan VA s'accompagne d'une double dissociation au niveau cérébral.

La seconde étude a été menée auprès d'un groupe d'enfants dyslexiques et normo-lecteurs dont les capacités de traitement phonologique et d'empan VA ont été évaluées (Liu *et al.*, 2022). Une technique d'IRM en tenseur de diffusion a été utilisée pour identifier les faisceaux de fibres de substance blanche associés à ces deux types de déficit. Cette technique permet d'évaluer s'il existe des différences structurelles au sein de la connectivité cérébrale et si ces différences sont corrélées aux résultats obtenus sur les épreuves comportementales. Les résultats de cette étude montrent que des faisceaux de substance blanche différents sont associés aux capacités phonologiques et d'empan VA. Des capacités limitées d'empan VA s'accompagnent d'une connectivité atypique au sein du réseau occipito-pariétal gauche (reliant neuf régions corticales dont le lobule pariétal supérieur). Des capacités phonologiques déficitaires sont associées à une connectivité atypique au sein de deux autres réseaux, un réseau frontal et un réseau temporo-pariétal (incluant notamment le gyrus temporal supérieur, le gyrus angulaire et le gyrus supramarginal). Ces résultats confirment que déficit phonologique et déficit de l'empan VA ont des bases neurales distinctes.

L'ensemble de ces travaux conduit à postuler l'existence de deux sous-types de dyslexies développementales caractérisés par des déficits cognitifs différents et des dysfonctionnements cérébraux spécifiques. Un de ces sous-types correspond à une dyslexie par déficit de l'empan VA.

Conclusion

On ne peut guère contester le fait que certaines formes de dyslexies développementales sont associées à un déficit de l'empan VA. Cela est largement documenté au niveau comportemental et a été démontré dans de nombreuses langues, alphabétiques et non alphabétiques (le chinois, par exemple). Un déficit de l'empan VA traduit des capacités d'attention visuelle limitées. Les modèles théoriques de référence suggèrent que ces capacités limitées, lorsqu'elles sont déployées sur la séquence du mot, ne permettent d'identifier simultanément qu'un nombre limité de lettres, ce qui empêche la reconnaissance rapide du mot et entraîne des erreurs de lecture. Ces modèles prédisent une relation

causale entre empan VA et apprentissage de la lecture. L'hypothèse de causalité est confortée par les recherches longitudinales qui montrent que l'empan VA mesuré avant l'apprentissage formel de la lecture est prédictif du niveau de lecture ultérieur des enfants et par les études interventionnelles qui montrent que les remédiations centrées sur l'empan VA se traduisent par une amélioration de la lecture chez les enfants dyslexiques. La question s'est donc posée de savoir si un déficit de l'empan VA définissait une forme de dyslexie spécifique. Plusieurs études ont montré une double dissociation entre déficit de l'empan VA et déficit phonologique dans la population dyslexique, en tout cas lorsque le déficit phonologique correspond à un déficit de développement de la conscience phonémique. Cette double dissociation cognitive s'accompagne d'une double dissociation neuronale. Les dysfonctionnements cérébraux observés chez les enfants qui présentent un déficit de l'empan VA diffèrent de ceux qui sont associés à un déficit phonologique. Les premiers intéressent des régions cérébrales et des réseaux neuronaux connus pour leur implication dans les traitements attentionnels ; les seconds concernent plutôt des régions périsylviennes impliquées dans les traitements phonologiques et langagiers. L'ensemble des données actuellement disponibles conduit à postuler l'existence d'une forme de dyslexie par déficit de l'empan VA, alors qu'une autre forme de dyslexie serait caractérisée par un déficit phonologique. La notion de dyslexie par double déficit devra certainement être retenue puisque certains enfants dyslexiques (même s'ils sont *a priori* peu nombreux) présentent à la fois un déficit phonologique et un déficit de l'empan VA.

L'existence de formes de dyslexies par déficit de l'empan VA a des conséquences directes en pratique clinique. Une évaluation des capacités d'empan VA doit être systématiquement proposée à tout enfant dyslexique, qu'il présente ou non un déficit de la conscience phonémique. La présence d'un déficit de l'empan VA doit conduire à proposer une remédiation adaptée. Il a été montré qu'un entraînement spécifique et intensif permet d'améliorer non seulement l'empan VA mais également le niveau de lecture des enfants dyslexiques. Enfin, un entraînement de l'empan VA pourrait être proposé à titre préventif. Entraîner l'empan VA chez des enfants pré-lecteurs pourrait être particulièrement indiqué lorsque ces enfants ont des capacités d'empan VA qui se situent au-dessous de la moyenne des enfants de leur âge. Plus largement, un entraînement systématique de l'empan VA devrait être proposé en classe, au début de l'apprentissage de la lecture, afin de favoriser l'apprentissage réussi du plus grand nombre d'élèves possible.

Références

Antzaka, A., Lallier, M., Meyer, S., Diard, J., Carreiras, M., & Valdois, S. (2017). Enhancing reading performance through action video games: the role of visual attention span. *Scientific Reports*, *7*, 14563.

Besner, D., Risko, E. F., Stolz, J. A., White, D., Reynolds, M., O'Malley, S., & Robidoux, S. (2016). Varieties of attention: their roles in visual word identification. *Psychological Science*, *25*(3), 162–168.

Boden, C., & Giaschi, D. (2007). M-stream deficits and reading-related visual processes in developmental dyslexia. *Psychological Bulletin*, *133*(2), 346–366.

Bosse, M. L., Tainturier, M. J., & Valdois, S. (2007). Developmental dyslexia: the visual attention span deficit hypothesis. *Cognition*, *104*, 198–230.

Bosse, M. L., & Valdois, S. (2003). Patterns of developmental dyslexia according to a multi-trace memory model of reading. *Current Psychology Letters*, *1*, 10.

Bosse, M. L., & Valdois, S. (2009). Influence of the visual attention span on child reading performance: A cross-sectional study. *Journal of Research in Reading*, *32*(2), 230–253.

Bouma, H. (1970). Interaction effects in parafoveal letter recognition. *Nature*, *226*(5241), 177–178.

Bouma, H., & Legein, C. P. (1977). Foveal and parafoveal recognition of letters and words by dyslexics and by average readers. *Neuropsychologia*, *15*, 69–80.

Bouvier-Chaverot, M., Peiffer, E., N'Guyen Morel, M. A., & Valdois, S. (2012). Un cas de dyslexie développementale avec trouble isolé de l'empan visuo-attentionnel. *Revue de Neuropsychologie*, *4*(1), 24–35.

Bundesen, C. (1990). A theory of visual attention. *Psychological Review*, *97*(4), 523–547.

Callens, M., Whitney, C., Tops, W., & Brysbaert, M. (2013). No deficiency in left-to-right processing of words in dyslexia but evidence for enhanced visual crowding. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *66*(9), 1803–1817.

Carrasco, M. (2011). Visual attention: The past 25 years. *Vision Research*, *51*, 1484–1525.

Chan, K. S. C., & Yeung, P. S. (2020). Prediction of Chinese reading fluency by verbal and non-verbal visual attention span measures. *Frontiers in Psychology*, *10*, 3049.

Chen, N. T., Zheng, M., & Ho, C. S. H. (2019). Examining the visual attention span deficit hypothesis in Chinese developmental dyslexia. *Reading and Writing*, *32*, 639–662.

Cheng, C., Yao, Y., Wang, Z., & Zhao, J. (2021). Visual attention span and phonological skills in Chinese developmental dyslexia. *Research in Developmental Disabilities*, 116.

De Jong, P. F., & Van den Boer, M. (2021). The relation of visual attention span with serial and discrete rapid automatized naming and reading. *Journal of Experimental Child Psychology*, *207*, 105093.

Engbert, R., Nuthmann, A., Richter, E. M., & Kliegl, R. (2005). SWIFT : A dynamical model of saccade generation during reading. *Psychological Review*, *112*(4), 777–813.

Facoetti, A., Lorusso, M. L., Paganoni, P., Cattaneo, C., Galli, R., & Mascetti, G. G. (2003). Auditory and visual automatic attention deficits in developmental dyslexia. Brain and. *Cognition*, *53*, 181–184.

Facoetti, A., & Molteni, M. (2001). The gradient of visual attention in developmental dyslexia. *Neuropsychologia*, *39*, 352–357.

Facoetti, A., Trussardi, A. N., Ruffino, M., Lorusso, M. L., Cattaneo, C., Galli, R., et al. (2010). Multisensory spatial attention deficits are predictive of phonological decoding skills in developmental dyslexia. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *22*, 1011–1025.

Facoetti, A., Zorzi, M., Cestnick, L., Lorusso, M. L., Molteni, M., Paganoni, P., et al. (2006). The relationship between visuo-spatial attention and nonword reading in developmental dyslexia. *Cognitive Neuropsychology*, *23*, 841–855.

Friedmann, N., & Coltheart, M. (2016). Types of developmental dyslexia. In A. Baron, & D. Ravid (Eds.), *Handbook of communication disorders: Theoretical, empirical and applied linguistics perspectives*. De Gruyter Mouton.

Germano, D. G., Reilhac, C., Capellini, A. S., & Valdois, S. (2014). The phonological and visual bases of DD in Brazilian Portuguese. *Frontiers in Educational Psychology*, *5*, 1169.

Ginestet, E., Phénix, T., Diard, J., & Valdois, S. (2019). Modelling the length effect for words in lexical decision: the role of visual attention. *Vision Research*, *159*, 10–20.

Ginestet, E., Valdois, S., & Diard, J. (2022). Probabilistic modeling of orthographic learning based on visuo-attentional dynamics. *Psychonomic Bulletin & Review*, *29*, 1649–1672.

Ginestet, E., Valdois, S., Diard, J., & Bosse, M. L. (2020). Orthographic learning of novel words in adults: Effect of exposure and visual attention on eye movements. *Journal of Cognitive Psychology*, *32*(8), 785–804.

Goswami, U. (2015). Sensory theories of developmental dyslexia: three challenges for research. *Nature Reviews Neuroscience*, *16*, 43–54.

Hari, R., & Renvall, H. (2001). Impaired processing of rapid stimulus sequences in dyslexia. *Trends in Cognitive Science*, *5*, 525–532.

Hinshelwood, J. (1917). *Congenital word blindness*. London: H. K. Lewis.

Huang, C., Lorusso, M. L., Luo, Z., & Zhao, J. (2019). Developmental Differences in the Relationship Between Visual Attention Span and Chinese Reading Fluency. *Frontiers in Psychology*, *10*, 2450.

Khan, A. Z., Prost-Lefebvre, M., Salemme, R., Blohm, G., Rossetti, Y., Tilikete, C., & Pisella, L. (2016). The attentional field of visual search in simultanagnosia and healthy individuals: how object and space attention interact. *Cerebal Cortex*, *26*(3), 1242–1254.

Lachter, J., Forster, K. I., & Ruthruff, E. (2004). Forty-five years after Broadbent (1958): Still no identification without attention. *Psychological Review*, *111*(4), 880–913.

Lallier, M., Donnadieu, S., Berger, C., & Valdois, S. (2010a). A case study of developmental phonological dyslexia: Is the attentional deficit in rapid stimuli sequences processing amodal? *Cortex*, *46*, 231–241.

Lallier, M., Donnadieu, S., Thierry, G., Tainturier, M. J., Billard, C., Peyrin, C., et al. (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.

Lallier, M., Tainturier, M. J., Dering, B., Donnadieu, S., Valdois, S., & Thierry, G. (2010b). Behavioral and ERP evidence for amodal sluggish attentional shifting in developmental dyslexia. *Neuropsychologia*, *48*, 4125–4135.

Lallier, M., Thierry, G., & Tainturier, M. J. (2013). On the importance of considering individual profiles when investigating the role of auditory sequential deficits in developmental dyslexia. *Cognition*, *126*, 121–127.

Lassus-Sangosse, D., N'Guyen-Morel, M. A., & Valdois, S. (2008). Sequential or simultaneous visual processing deficit in developmental dyslexia. *Vision Research*, *48*, 979–988.

Lien, M. C., Ruthruff, E., Kouchi, S., & Lachter, J. (2010). Even frequent and expected words are not identified without spatial attention. *Attention, Perception and Psychophysics*, *72*(4), 973–988.

Liu, T., Thiebaut de Schotten, M., Altarelli, I., Ramus, F., & Zhzo, J. (2022). Neural dissociation of visual attention span and phonological deficits in developmental dyslexia: A hub-based white matter network analysis. *Human Brain Mapping*, *43*(17), 5210–5219.

Liu, J., Ren, X., Wang, Y., & Zhao, J. (2023). Visual attention span capacity in developmental dyslexia: A meta-analysis. *Research in Developmental Disabilities*, *135*, 104465.

Lobier, M., Dubois, M., & Valdois, S. (2013). The role of visual processing speed in reading speed development. *Plos One*, *8*(4), e58097.

Lobier, M., Peyrin, C., Pichat, C., Le Bas, J. F., & Valdois, S. (2014). Visual processing of multiple elements in the dyslexic brain, evidence for a superior parietal dysfunction. *Frontiers in Human Neurosciences*, *8*, 479.

Lobier, M., & Valdois, S. (2015). Visual attention deficits in developmental dyslexia cannot be ascribed solely to poor reading experience. *Nature Reviews Neuroscience*, *16*(4), 225.

Lobier, M., Zoubrinetzky, R., & Valdois, S. (2012). The visual attention span deficit in developmental dyslexia is visual and not verbal. *Cortex*, *48*(6), 768–773.

Livingstone, M. S., Rosen, D. G., Drislane, F. W., & Galaburda, A. M. (1991). Physiological and anatomical evidence for a magnocellular defect in developmental dyslexia. *Proceedings of the National Academy of Science*, *88*, 7943–7947.

Manis, F., & Bailey, C. E. (2008). Exploring heterogeneity in developmental dyslexia: A longitudinal investigation. In G. Reid, A. Fawcett, F. Manis, & L. Siegle (Eds.), *The SAGE Handbook of Dyslexia (149-73)*. London: SAGE publications Ltd.

Marinelli, C. V., Zoccolotti, P., & Romani, C. (2020). The ability to learn new written words is modulated by language orthographic consistency. *PLoS One*, *15*(2), e0228129.

Martelli, M., Di Filippo, G., Spinelli, D., & Zoccolotti, P. (2009). Crowding, reading, and developmental dyslexia. *Journal of Vision*, *9*(4), 14. 1-18.

Meyer, S., Diard, J., & Valdois, S. (2018). Lecteurs, votre attention s'il vous plaît ! Le rôle de l'attention visuelle en lecture. *ANAE*, *157*, 697–705.

Morgan, W. P. (1896). A case of congenital word blindness. *Medical Journal*, *11*, 378.

Niolaki, G. Z., Vousden, J., Terzopoulos, A. R., Taylor, L. M., Hall, S., & Masterson, J. (2021). Predictors of single word spelling in English speaking children: A cross sectional study. *Journal of Research in Reading*, 1–20.

Pelli, D. G., & Tillman, K. A. (2008). The uncrowded window of object recognition. *Nature Neuroscience*, *11*(10), 1129–1135.

Perry, C., & Long, H. (2022). What is going on with visual attention in reading and dyslexia? A critical review of recent studies. *Brain Sciences*, *12*, 87.

Peterson, R. L., Pennington, B. F., & Olson, L. K. (2013). Subtypes of developmental dyslexia: testing the predictions of the dual-route and connectionist frameworks. *Cognition*, *126*, 20–38.

Peyrin, C., Démonet, J. F., Baciu, M., Le Bas, J. F., & Valdois, S. (2011). Superior parietal lobe dysfunction in a homogeneous group of dyslexic children with a single visual attention span disorder. *Brain & Language*, *118*, 128–138.

Peyrin, C., Lallier, M., Démonet, J. F., Pernet, C., Baciu, M., LeBas, J. F., & Valdois, S. (2012). Neural dissociation of phonological and visual attention span disorders in developmental dyslexia: fMRI evidence from two case studies. *Brain & Language*, *120*(3), 381–394.

Prado, C., Dubois, M., & Valdois, S. (2007). Eye movements in reading aloud and visual search in developmental dyslexia: impact of the VA span. *Vision Research*, *47*, 2521–2530.

Phénix, T. (2018). *Modélisation Bayésienne Algorithmique de la reconnaissance visuelle de mots et de l'attention visuelle (thèse de doctorat)*. Université Grenoble-Alpes.

Phénix, T., Diard, J., & Valdois, S. (2016). Les modèles computationnels de lecture. In Sato M., & Pinto S. (Eds.), *Traité de Neurolinguistique (167-82)*. De Boeck supérieur.

Reichle, E. D., Warren, T., & McConnell, K. (2009). Using E-Z reader to model the effects of higher level language processing on eye movements during reading. *Psychonomic Bulletin and Review*, *16*(1), 1–21.

Reilhac, C., Peyrin, C., Démonet, J. F., & Valdois, S. (2013). Role of the superior parietal lobules in letter-identity processing within strings: fMRI evidence from skilled and dyslexic readers. *Neuropsychologia*, *51*(4), 601–612.

Richlan, F. (2012). Developmental dyslexia: Dysfunction of a left-hemisphere reading network. *Frontiers in Human Neuroscience*, *6*, 120.

Saksida, A., Ianuzzi, S., Bogliotti, C., Chaix, Y., Démonte, J. F., Bricout, L., et al. (2016). Phonological skills, visual attention span and visual stress in developmental dyslexia. *Developmental Psychology*, *52*(10), 1503–1516.

Snell, J., Van Leipsig, S., Grainger, J., & Meeter, M. (2018). OB1-Reader: A Model of Word Recognition and Eye Movements in Text Reading. *Psychological Review*, *125*(6), 969–984.

Spinelli, D., De Luca, M., Judica, A., & Zoccolotti, P. (2002). Crowding Effects on Word Identification in Developmental Dyslexia. *Cortex*, *38*(2), 179–200.

Sprenger-Charolles, L., Colé, P., Lacert, P., & Serniclaes, W. (2000). On subtypes of developmental dyslexia: Evidence from processing time and accuracy scores. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, *54*(2), 87–103.

Stein, J. F. (2018). Does dyslexia exist? *Language, Cognition and Neuroscience*, *33*(3), 313–320.

Stein, J. F. (2019). The current status of the magnocellular theory of developmental dyslexia. *Neuropsychologia*, *130*, 66–77.

Stein, J. F., & Walsh, V. (1997). To see but not to read; the magnocellular theory of dyslexia. *Trends in Neuroscience*, *20*(4), 147–152.

Toledano, L., & Friedmann, N. (2023). Letter migrations between words in reading aloud can result either from an impairment in orthographic input or in phonological output. *Brain Sci*, *13*(4), 588.

Valdois, S. (2022). The visual attention span deficit in developmental dyslexia: Review of evidence for a visual-attention-based deficit. *Dyslexia*, *28*(4), 397–415.

Valdois, S., Bidet-Ildei, C., Lassus-Sangosse, D., Reilhac, C., N'Guyen-Morel, M. A., Guinet, E., et al. (2011). A visual processing but no phonological disorder in a child with mixed dyslexia. *Cortex*, *47*, 1197e1218.

Valdois, S., Bosse, M. L., Ans, B., Zorman, M., Carbonnel, S., David, D., et al. (2003). Phonological and visual processing deficits are dissociated in developmental dyslexia: evidence from two case studies. *Reading and Writing*, *16*, 543e572.

Valdois, S., Bosse, M. L., & Tainturier, M. J. (2004). Cognitive correlates of developmental dyslexia: Review of evidence for a selective visual attentional deficit. *Dyslexia*, *10*, 1–25.

Valdois, S., Guinet, E., & Embs, J.L. (2017). Evadys: Logiciel d'évaluation du niveau d'empan visuo-attentionnel. En ligne (consulté le 2 mai 2023) : https://www.happyneuronpro.com/orthophonie/espace-evaluation/evadys/

Valdois, S., Phénix, T., Fort, M., & Diard, J. (2021a). Atypical viewing position effect in developmental dyslexia: A behavioral and modeling approach. *Cognitive Neuropsychology*, *38*(5), 319–335.

Valdois, S., Lassus-Sangosse, D., Lallier, M., Moreaud, O., & Pisella, L. (2019a). What bilateral damage of the superior parietal lobes tells us about visual attention disorders in developmental dyslexia? *Neuropsychologia*, *130*, 78–91.

Valdois, S., Lassus-Sangosse, D., & Lobier, M. (2012). Impaired letter string processing in developmental dyslexia: what visual-to-phonological code mapping disorder? *Dyslexia*, *18*(2), 77–93.

Valdois, S., Peyrin, C., Lassus-Sangosse, D., Lallier, M., Démonet, J. F., & Kandel, S. (2014). Dyslexia in a French-Spanish bilingual girl : Behavioral and neural modulations following a specific visual-attention span intervention program. *Cortex*, *53*, 120–145.

Valdois, S., Reilhac, C., Ginestet, E., & Bosse, M. L. (2021b). Varieties of cognitive profiles in poor readers: evidence for a VAS-impaired subtype. *Journal of Learning Disabilities*, *54*(3), 221–233.

Valdois, S., Roulin, J. L., & Bosse, M. L. (2019b). Visual attention modulates reading acquisition. *Vision Research*, *165*, 152–161.

Valdois, S., & Zoubrinetzky, R. (2022). Entraîner l'empan VA améliore le niveau de lecture des enfants dyslexiques. In F. Bois-Parriaud, S. Joly-Froment, & A. Witko (Eds.), *Actualité du langage écrit (p 115-132)*. Paris: Ortho-Édition.

Van den Boer, M., & De Jong, P. F. (2018). Stability of visual attention span performance and its relation with reading over time. *Scientific Studies of Reading*, *22*(5), 334–341.

Van den Boer, M., De Jong, P. F., & Haentjens-Van Meeteren, M. M. (2013). Modeling the length effect: Specifying the relation with visual and phonological correlates of reading. *Scientific Studies of Reading*, *17*(4), 243–256.

Van den Boer, M., Van Bergen, E., & De Jong, P. F. (2015). The specific relation of visual attention span with reading and spelling in Dutch. *Learning and Individual Differences*, *39*, 141–149.

Vellutino, F. R. (1979). *Dyslexia: Theory and Research*. Cambridge, MA: MIT Press.

Waechter, S., Besner, D., & Stolz, J. A. (2011). Basic processes in reading: Spatial attention as a necessary preliminary to orthographic and semantic processing. *Visual Cognition*, *19*(2), 171–202.

Witton, C., Talcott, J. B., Hansen, P. C., Richardson, A. J., Griffiths, T. D., Rees, A., et al. (1998). Sensitivity to dynamic auditory and visual stimuli predicts nonword reading ability in both dyslexic and normal readers. *Current Biology*, *8*(14), 791–797.

Zhao, J., Liu, M., Li, J., Sun, H., Liu, Z., Gao, J., et al. (2019). Improving sentence reading performance in Chinese children with developmental dyslexia by training based on visual attention span. *Scientific Reports*, *9*, 18964.

Zorzi, M., Barbiero, C., Facoetti, A., Lonciari, I., Carrozzi, M., Montico, M., et al. (2012). Extra large letter spacing improves reading in dyslexia. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, *109*, 11455–11459.

Zoubrinetzky, R., Bielle, F., & Valdois, S. (2014). New insights on developmental dyslexia subtypes: Heterogeneity of mixed reading profiles. *Plos One*, *9*(6), e99337.

Zoubrinetzky, R., Collet, G., N'Guyen-Morel, M. A., Valdois, S., & Serniclaes, W. (2019). Remediation of allophonic perception and visual attention span in developmental dyslexia: a joint assay. *Frontiers in Psychology*, *10*, 1502.

Zoubrinetzky, R., Collet, G., Serniclaes, W., N'Guyen-Morel, M. A., & Valdois, S. (2016). Relationships between categorical perception of phonemes, phonological awareness, and visual attention span in developmental dyslexia. *PLoS One*, *11*(3), e0151015.