



**HAL**  
open science

## L'apprentissage de la lecture

Sylviane Valdois

► **To cite this version:**

Sylviane Valdois. L'apprentissage de la lecture. Nicolas Poirel. Neurosciences Cognitives Développementales, De Boeck, pp.129-161, 2020, Neuropsychologie, 9782807327474. hal-04548984

**HAL Id: hal-04548984**

**<https://hal.science/hal-04548984>**

Submitted on 16 Apr 2024

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

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

## L'apprentissage de la lecture

Sylviane Valdois

DR CNRS, laboratoire de Psychologie et NeuroCognition (UMR5105), Université Grenoble-Alpes.

Valdois, S. (2020). L'apprentissage de la lecture. In N. Poirel (Ed.). Neurosciences Cognitives Développementales (p.129-151). Editions de Boeck Supérieur.

L'invention de l'écriture a marqué un tournant dans l'histoire de l'humanité. Cette invention a profondément modifié les modes de communication et de transmission des connaissances entre individus, dans le temps et dans l'espace. Devenir lecteur est aujourd'hui la condition sine qua non d'une scolarité réussie, d'une bonne intégration sociale et du plein exercice de la citoyenneté (Morais, 2016). Il est fondamental de comprendre à quel point l'écrit a modifié notre fonctionnement cérébral, au niveau tant cognitif que neurobiologique, afin d'identifier les bases neurocognitives de l'apprentissage de la lecture. Des études de plus en plus nombreuses se penchent sur la question ouvrant de nouvelles perspectives tant pour la prévention des difficultés d'apprentissage que pour la remédiation des dyslexies développementales.

Comprendre les mécanismes en jeu dans l'apprentissage de la lecture implique d'abord de comprendre le déroulement temporel de cet apprentissage, question qui sera abordée dans la première section de ce chapitre. Les différents modèles proposés accordent un rôle central à l'apprentissage des relations entre graphèmes (lettre ou groupe de lettres comme « a », « ph » ou « oi ») et phonèmes (i.e. les unités phonologiques correspondantes, soit /a/, /f/ ou /wa/ dans les exemples précédents). Cette mise en correspondance va nécessiter d'une part, d'ajuster les traitements auditifs afin d'identifier les phonèmes qui composent les mots parlés et d'autre part, d'ajuster les traitements visuels afin d'identifier les graphèmes qui composent les mots écrits. Ces questions seront discutées en lien avec les modifications neuronales qu'elles entraînent tant au sein du réseau neuronal du langage parlé que dans les régions cérébrales impliquées dans les traitements visuo-orthographiques. Tous les modèles d'apprentissage postulent également l'importance de la mémorisation de la forme orthographique des mots pour passer d'une lecture lente et laborieuse à la lecture experte de l'adulte (Castles, Rastle & Nation, 2018). Cela sera l'occasion de mettre l'accent sur une région cérébrale

particulière, la région de la forme visuelle des mots (ou visual word form area, VWFA) et d'étudier la connectivité cérébrale que cette région entretient avec les zones langagières et visuelles.

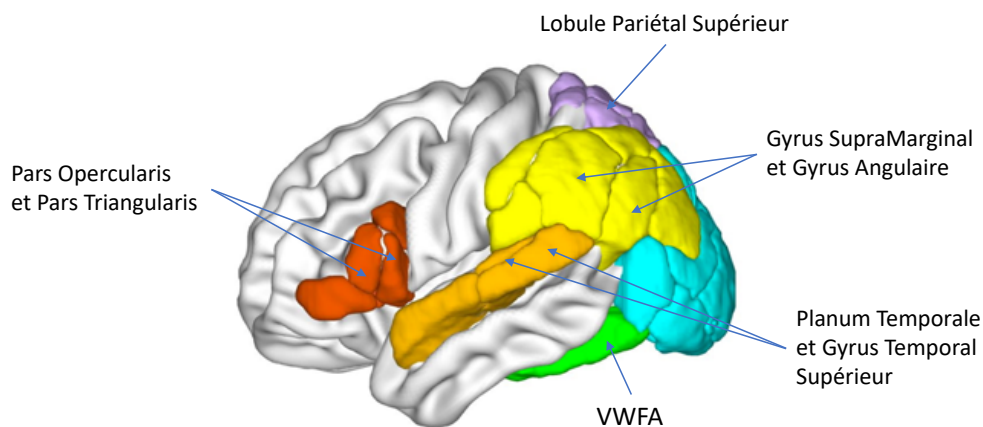


Figure 1 : Les régions cérébrales de la lecture au sein de l'hémisphère gauche. Les régions périsylviennes gauches incluent le gyrus frontal inférieur (rouge), le gyrus temporal supérieur (orange) et le lobule pariétal inférieur (jaune). Le cortex occipital est en bleu ; les régions ventrales occipito-temporales inférieures sont en vert et le lobule pariétal supérieur en mauve. *(Remerciements à Cédric Pichat, LPNC, pour la réalisation de la figure).*

## Les théories de l'apprentissage de la lecture

Les premiers modèles proposés pour rendre compte du décours temporel de l'apprentissage de la lecture concevaient cet apprentissage comme une succession d'étapes ou stades se caractérisant par l'acquisition de compétences différentes (Ehri, 2017 ; Frith, 1985). Ainsi, Frith (1985) postule l'existence de trois étapes successives : un stade initial dit « logographique » au cours duquel l'enfant se base sur certaines caractéristiques visuelles du mot écrit et sur son contexte d'apparition pour produire une forme orale correspondante. Ce stade précède l'apprentissage formel de la lecture et repose essentiellement sur l'expérience que l'enfant a de l'écrit dans son environnement. La relation établie entre le mot écrit et sa forme orale est relativement arbitraire et source d'erreurs. Ce stade est remplacé par le stade « alphabétique » lorsque débute l'apprentissage explicite de la lecture. L'enfant apprend alors les relations entre les lettres et les sons et devient capable de décoder le mot écrit en associant chaque graphème au phonème correspondant. Le stade alphabétique permet de décoder les mots écrits par application systématique des relations graphème-phonème mais la lecture est lente

et laborieuse. Ce stade est notamment caractérisé par un effet de longueur important, le décodage d'un mot long demandant plus de temps que le décodage d'un mot court. Le dernier stade dit « orthographique » est celui de la lecture experte. Le mot est alors reconnu comme forme orthographique familière. L'activation d'une représentation orthographique du mot en mémoire permet de le reconnaître rapidement et d'activer la forme phonologique correspondante avec la même efficacité qu'il s'agisse d'un mot long ou d'un mot court. Ce stade est donc caractérisé par une lecture rapide et la disparition des effets de longueurs pour les mots familiers. Il est également caractérisé par la capacité à lire les mots irréguliers (comme « femme » ou « écho ») qui ne peuvent être correctement décodés par application des relations graphème-phonème.

Cette conception en étapes va progressivement être remplacée par une conception plus continue de l'apprentissage, telle que décrite dans le cadre des modèles en vagues (*overlapping wave models*, Siegler, 1996). Ces modèles postulent la co-existence de compétences diverses tout-au-long de l'apprentissage. Selon cette conception, l'enfant développe des compétences alphabétiques et orthographiques dès le début de l'apprentissage et va pouvoir convoquer l'une ou l'autre de ces compétences selon le mot à traiter (Rittle-Johnson & Siegler, 1999). Les compétences alphabétiques seront davantage mobilisées dans un premier temps (mimant ce qui était préalablement considéré comme le stade alphabétique) et le seront de moins en moins avec le temps au bénéfice des traitements orthographiques de plus en plus efficaces et donc privilégiés dans un second temps. Cette conception de l'apprentissage qui postule la cooccurrence de compétences variées tout-au-long de l'apprentissage permet notamment de mieux rendre compte de la variabilité inter- et intra-individuelle observée au niveau comportemental.

La théorie de l'auto-apprentissage proposée par Share (1995, 1999) va apporter un éclairage nouveau sur l'apprentissage de la lecture en retenant l'idée de la succession de deux étapes, alphabétique puis orthographique, mais en limitant cette succession au niveau de chaque mot. L'apport majeur de cette théorie est de postuler que le recodage phonologique est un mécanisme d'auto-apprentissage permettant au lecteur d'acquérir de nouvelles connaissances orthographiques en toute autonomie. Selon cette théorie, l'enfant applique spontanément ses connaissances quant aux relations graphème-phonème pour décoder un mot écrit qu'il rencontre pour la première fois et tout décodage réussi du mot offre l'opportunité de mémoriser sa forme orthographique. Après seulement quelques expositions répétées au même mot, la forme orthographique correspondante en mémoire est suffisamment stabilisée pour que le mot soit reconnu d'emblée et lu rapidement (Castles & Nation, 2006 ; Cunningham, Perry, Stanovich & Share, 2002 ; Share, 2004). Cette théorie est aujourd'hui très largement acceptée. D'une part, elle a le mérite de proposer une réinterprétation des modèles conceptuels précédents : la

probabilité que le mot rencontré soit nouveau est plus grande en début d'apprentissage ce qui induit une prédominance des traitements alphabétiques, tel que postulé dans les modèles à étapes, alors même que l'enfant peut simultanément démontrer des compétences orthographiques lors du traitement d'autres mots, tel que postulé par les modèles en vagues. D'autre part, elle met l'accent sur le rôle fondamental des traitements phonologiques dans l'acquisition des traitements alphabétiques et orthographiques, rôle largement reconnu aujourd'hui tant dans le cadre de l'apprentissage normal que pathologique.

Néanmoins, cette théorie minimise le rôle potentiel des traitements visuels et visuo-attentionnels dans l'apprentissage de la lecture. Elle s'oppose en cela assez fortement à un des premiers modèles conceptuels de l'apprentissage de la lecture, la théorie du traitement automatique de l'information en lecture proposée par Laberge et Samuels en 1974. Cette théorie qui est assez largement tombée dans l'oubli au cours des dernières années, retrouve une certaine légitimité au vu des recherches témoignant d'une spécialisation des traitements visuels lors de l'apprentissage de la lecture et d'une implication de ressources visuo-attentionnelles lors du traitement des lettres dans la séquence du mot. Dans leur modèle, Laberge et Samuels (1974) attribuent un rôle crucial à l'attention qui est mobilisée pour le traitement d'unités nouvelles qui n'ont pas encore été mémorisées. Elle intervient notamment pour créer des unités de rang supérieur à partir des unités de rang inférieur qui les composent. Imaginons que le lecteur ait déjà rencontré à plusieurs reprises la lettre « U » et la lettre « O » et qu'une représentation de chacune de ces lettres ait été mémorisée ; il pourra ensuite mobiliser son attention pour traiter les lettres « O » et « U » qui composent le graphème « OU ». Une fois cette relation établie et renforcée lors de rencontres successives avec la même séquence, le graphème « OU » sera mémorisé et pourra dès lors être traité automatiquement, c.a.d. sans recours à l'attention. Le modèle postule ainsi que l'attention est mobilisée sur les traits visuels pour créer une représentation des lettres, sur les lettres pour créer des unités de taille supérieure comme les graphèmes ou les syllabes, et ainsi de suite jusqu'au mot. Une fois l'unité créée et renforcée, l'attention n'est plus nécessaire à son traitement. Elle peut dès lors être utilisée pour d'autres types de traitements, par exemple, le traitement du sens lorsque la plupart des mots sont traités automatiquement comme chez le lecteur expert. Un éclairage nouveau sur ce modèle sera apporté dans la section portant sur les traitements visuels et visuo-attentionnels impliqués dans l'apprentissage de la lecture, mais commençons par préciser le rôle des traitements langagiers et phonologiques dans cet apprentissage.

## Les dimensions auditives, langagières et phonologiques de l'apprentissage de la lecture

### Interactions entre développements langagiers et apprentissage de la lecture

Il existe des relations étroites et bi-directionnelles entre développement du vocabulaire oral et acquisition de la lecture. L'apprentissage formel de la lecture débute dans tous les pays à un âge où l'enfant a normalement développé de bonnes compétences langagières. Une vision naïve de l'apprentissage de la lecture pourrait consister à dire que cet apprentissage implique de mémoriser les représentations orthographiques des mots écrits et d'établir des liens entre ces nouvelles connaissances et les connaissances pré-existantes sur la forme orale et le sens des mots. En accord avec cette hypothèse, les enfants prélecteurs qui disposent d'un bon niveau de vocabulaire oral apprennent à lire plus rapidement que ceux dont le niveau de vocabulaire est limité (National Reading Panel, 2000). Mais ce lien est loin d'être unidirectionnel. En fait, l'apprentissage de la lecture affecte les compétences langagières. Il permet notamment d'enrichir le vocabulaire oral de l'enfant lecteur et d'améliorer ses connaissances sur le sens des mots (Duff, Tomblin & Catts, 2015 ; Quinn, Wagner, Petscher & Lopez, 2015). Cette relation est un parfait exemple de l'effet Matthieu (Stanovich, 1986). Les enfants qui ont initialement un bon niveau de vocabulaire apprennent à lire plus facilement ce qui en retour contribue à améliorer encore leur niveau de vocabulaire (les riches en vocabulaire deviennent plus riches). Inversement, un faible niveau de vocabulaire chez les prélecteurs contribue à retarder l'apprentissage de la lecture, ce qui affecte le développement du vocabulaire oral (les pauvres en vocabulaire deviennent plus pauvres).

Être confronté à la forme écrite des mots lors de l'apprentissage de la lecture a également pour conséquence d'améliorer la représentation phonologique des mots. En effet, la forme orale des mots est relativement variable selon le contexte de production et la vitesse d'énonciation. Ainsi, la prononciation du mot « quatre » peut ne pas inclure la production du /R/ final (/kat/ ou /katR/), comme par exemple dans /kat'sEzô/. Du fait de cette variabilité, acquérir une représentation phonologique totalement spécifiée du mot, incluant le /R/ final, représente une difficulté pour le jeune enfant. Chevrot, Beaud & Varga (2000) ont exposé des

groupes d'enfants de 8-9 ans à des mots nouveaux présentés comme étant les noms d'animaux imaginaires représentés en image. Ces mots se terminaient tous par un groupe consonantique incluant le son /R/ (par exemple, /pR/ dans /malipR/ « malipre »). La forme sonore présentée à l'enfant comprenait ou non la prononciation du /R/ final (/oemalipRblâ/ ou (/oemalip'blâ/ pour « un malipre blanc »). Les mots étaient soit présentés à l'oral au cours de séances successives, soit présentés à l'oral lors des deux premières séances puis sous forme écrite et orale lors des deux suivantes. Les auteurs montrent que les enfants seulement exposés à la forme orale du mot dénomment ensuite l'image de l'animal avec une probabilité à peu près égale de produire ou non le /R/ final. Par contre, ils dénomment très majoritairement l'image en produisant la forme phonologique complète (/malipR/) dès que la formation écrite leur a été simultanément présentée. Être exposé à la forme écrite des mots semble donc renforcer et stabiliser la représentation phonologique en mémoire de ces mots.

### Développement de la conscience phonologique

Plusieurs types de tâches sont utilisées expérimentalement pour mesurer la sensibilité des enfants aux unités phonologiques, on parle d'épreuves métaphonologiques visant à mesurer la conscience phonologique de l'enfant. Quelques exemples du type d'épreuves classiquement utilisées sont proposés dans le tableau 1. Ces épreuves nécessitent d'identifier et de manipuler des unités de taille différentes, telles que les syllabes (/bal/-/kô/ dans /balkô/ balcon), les rimes (ex : /aR/ dans /kaR/ « car » ou /u/ dans /bu/ « bout »), l'attaque (consonne(s) initiale(s) d'une syllabe, par exemple le /b/ de /baR/ « bar » ou le /fl/ de /flak/ « flaque ») ou les phonèmes (/f/-/u/-/R/ de /fuR/ « four »). Les recherches montrent que les enfants prennent conscience de ces unités à des âges différents (Ziegler & Goswami, 2005). Ainsi, les enfants sont très tôt sensibles aux unités phonologiques les plus larges ; ils peuvent dès 3-4 ans démontrer leur aptitude à identifier et manipuler les syllabes d'un mot. La capacité à traiter les unités constitutives de la syllabe que sont la rime et l'attaque apparaît un peu plus tard autour de 4-5 ans. Ce qu'il est important de noter ici, c'est que la sensibilité aux syllabes, aux rimes et aux attaques est objectivable chez l'enfant pré-lecteur, mais cela n'est pas le cas pour les phonèmes (les plus petites unités phonologiques permettant de distinguer des mots de sens différent, comme /bê/-/pê/ « bain-pain » ou /Sâ/-/bâ/ « champ-banc »). La capacité à

identifier des phonèmes à l'intérieur des mots parlés apparaît le plus souvent avec l'apprentissage de la lecture. On parle donc d'un développement plus tardif de la conscience phonémique.

Tableau 1 : Exemples d'épreuves métaphonologiques et indications quant à leur âge d'acquisition.

Types d'épreuves	Consigne orale	Réponse	Age
Comptage syllabique	Frapper dans les mains le nombre de syllabes du mot /sinema/ (cinéma)	3 frappes	3-4 ans
Jugement de rimes	Est-ce que /radi/ et /uti/ riment ? (radis-outil)	OUI	4-5 ans
Sensibilité à l'attaque	Trouver l'intrus dans /tabl/ - /teR/ - /sak/ (table-terre-sac)	/sak/	4-5 ans
Omission de phonème	Enlever le premier son de /plakaR/ (placard)	/lakaR/	6 et +
Segmentation phonémique	Donner tous les sons du mot /fuR/ (four)	/f/-/u/-/R/	6 et +
Fusion phonémique	Prononcer le mot formé de /k/-/a/-/v/	/kav/ (cave)	6 et +

Montrer que les enfants sont capables de traiter les phonèmes à un âge plus avancé qui correspond à l'entrée dans la lecture, ne permet pas de conclure que l'identification des phonèmes est subordonnée à l'apprentissage de la lecture. En effet, plusieurs facteurs confondus pourraient également rendre compte de cette concomitance. Par exemple, il faut peut-être attendre un certain niveau de maturation cérébrale pour que le traitement des unités phonémiques devienne possible. Ceci pourrait expliquer que les phonèmes soient identifiés plus tard, à un âge qui correspond également à celui où débute l'apprentissage explicite de la lecture. Une façon de départager ces hypothèses est de comparer les capacités de traitement des phonèmes chez des adultes d'âge équivalent dont certains ont appris à lire et d'autres pas. On élimine ainsi tout effet de maturation cérébrale sur les performances. Les recherches qui ont comparé des adultes non lecteurs n'ayant jamais fréquenté l'école et des adultes lecteurs montrent que seuls les lettrés sont capables d'identifier et de manipuler les phonèmes qui composent les mots parlés (Morais, 1979). Ces résultats sont plutôt en faveur d'un lien entre apprentissage de la lecture et développement de la conscience phonémique. Néanmoins, on pourrait objecter que les adultes illettrés ont potentiellement une moins bonne maîtrise de la langue orale et notamment un niveau de vocabulaire plus faible. Dans ce cas, l'absence de conscience phonémique observé chez eux pourrait simplement résulter de leurs faibles aptitudes langagières. Une étude répond clairement à cette question. Morais (1994)



s'est intéressé à des populations de poètes illettrés. Il a montré que les poètes illettrés n'avaient pas développé de conscience phonémique alors même qu'ils avaient une très bonne maîtrise de la langue orale et jouaient avec les rimes et les assonances avec une grande virtuosité. Par exemple, ils n'analysent pas le mot /lak/ comme étant composé de trois unités (phonèmes) et ne peuvent réussir les épreuves d'omission ou de segmentation phonémique qui leur sont proposées. L'ensemble des données suggère donc bien que c'est l'apprentissage de la lecture qui favorise le développement de la conscience phonémique.

En fait, cette conclusion n'est pas tout-à-fait juste. En effet, d'autres études ont montré que le simple fait d'être lecteur ne suffit pas au développement de la conscience phonémique (Read, Zhang, Nie & Ding, 1986). Read et collaborateurs ont demandé à des lecteurs chinois d'effectuer des épreuves demandant d'identifier et de manipuler des phonèmes. L'intérêt de la langue chinoise est qu'elle peut s'écrire de deux façons : sous une forme non alphabétique (de type logographique, qui n'entretient pas de lien avec la prononciation du mot) et sous une forme alphabétique (le pinyin, où les symboles écrits sont en correspondance avec les sons). Ils ont donc comparé les performances de ces deux types de lecteurs sur les épreuves phonémiques proposées. Leurs résultats montrent que les participants qui ne connaissent que l'écriture logographique du chinois, ont de grandes difficultés à réaliser les épreuves de segmentation phonémique proposées alors que les participants lecteurs du pinyin réalisent ces épreuves sans difficulté. Ce n'est donc pas le fait d'apprendre à lire qui permet l'émergence de la conscience phonémique, mais le fait d'apprendre à lire dans une langue alphabétique.

### Conscience phonémique et lecture

La conscience phonémique entretient un lien étroit avec les systèmes orthographiques utilisés pour retranscrire les phonèmes dans les langues alphabétiques. On oppose classiquement les langues transparentes, comme le finlandais, le grec ou l'italien, aux langues opaques, comme le français ou l'anglais. Les premières se caractérisent par des liens directs et univoques entre graphèmes et phonèmes (un même graphème se prononce toujours de la même façon), alors que ces liens sont beaucoup plus complexes dans les secondes (« t » se prononce /t/ ou /s/ en français, ex : « question » versus « addition »). Ceci a pour conséquence que les enfants parviennent rapidement à lire sans erreur dans les langues transparentes (en général au cours de

la première année d'apprentissage formel) alors que les erreurs restent nombreuses chez les lecteurs débutants dans les langues opaques (Seymour, Aro & Erskine, 2003). On observe en parallèle que les performances en conscience phonémique sont bien meilleures chez les premiers que chez les seconds, suggérant que la transparence de la relation entre graphème et phonème favorise le développement de la conscience phonémique (Byalistok, Luk & Kwan, 2005 ; Ziegler & Goswami, 2005).

Trois types de résultats plaident en faveur d'un lien fort entre conscience phonémique et apprentissage de la lecture : les données issues d'études longitudinales où la conscience phonémique est évaluée en amont et le niveau de lecture quelques mois ou années plus tard chez les mêmes enfants, les données issues de l'étude des troubles spécifiques de l'apprentissage de la lecture ou dyslexies développementales et les données issues de recherches qui proposent des entraînements de la conscience phonémique et évaluent leurs effets sur le niveau de lecture.

Les études longitudinales montrent que le niveau de conscience phonémique mesuré en amont est prédictif du niveau de lecture ultérieur et ce lien est retrouvé dans différentes langues alphabétiques qu'elles soient opaques ou transparentes (Caravolas, Lervåg, Mousikou, Efrim, et al., 2012 ; Caravolas, Lervåg, Defior, Seidlová Málková et al., 2013 ; Vaessen, Bertrand, Toth et al., 2010). Cela pourrait suggérer une relation causale : c'est parce que les enfants ont une bonne conscience phonémique qu'ils apprennent à lire plus facilement. Une telle conclusion ne peut cependant être valide que si l'on démontre que les enfants n'ont aucune connaissance en lecture lors de l'évaluation initiale (Castles & Coltheart, 2004). En fait, les données disponibles ne permettent pas de répondre avec certitude à cette question. La conscience phonémique semble contribuer moins systématiquement à prédire le niveau ultérieur de lecture lorsqu'elle est initialement évaluée chez des enfants qui n'ont aucune connaissance en lecture ou lorsqu'on contrôle l'effet potentiel des connaissances initiales en lecture sur le niveau de conscience phonémique (Landerl, Freudenthaler, Heene, de Jong et al., 2019 ; Valdois, Roulin & Bosse, 2019).

Un déficit de la conscience phonémique est également décrit en contexte dyslexique. La comparaison de groupes d'enfants normo-lecteurs et de groupes d'enfants dyslexiques montre

que les seconds ont en moyenne de moins bonnes performances dans les épreuves de conscience phonémique (Vellutino, Fletcher, Snowling et al., 2004 ; Melby-Lervag, Lyster & Hulme, 2012). Le déficit de conscience phonémique s'observe aussi bien dans les langues transparentes que dans les langues opaques mais un déficit plus sévère est relaté dans le contexte des langues opaques (Landerl, Ramus, Moll, Lyytinen et al., 2013). Acquérir des compétences phonémiques est plus complexe pour les débutants lecteurs de langues opaques et cette acquisition est d'autant plus difficile pour les enfants dyslexiques confrontés à des langues opaques.

Enfin, plusieurs études témoignent de l'effet positif d'un entraînement phonologique sur les performances en lecture. Proposer un entraînement systématique et explicite de la conscience phonémique préalablement à l'apprentissage formel de la lecture ou parallèlement à cet apprentissage a pour conséquence d'améliorer le niveau de lecture des enfants (Bus & van IJzendoorn, 1999 ; Ehri, Nunes, Willows, et al., 2001 ; Torgesen, Alexander, Wagner et al., 2001). Les enfants dyslexiques bénéficient également d'un entraînement de la conscience phonémique (Galushka, Ise, Krick & Schulte-Korne, 2014). Cependant, les entraînements qui revendiquent entraîner la conscience phonémique ne sont le plus souvent pas limités à exercer l'identification des phonèmes au sein des mots parlés mais incluent l'utilisation de lettres et leur manipulation, ce qui conduit à entraîner également les relations graphèmes-phonèmes. Ces entraînements sont efficaces lorsqu'ils sont combinés à l'utilisation de lettres mais n'ont pas d'effet significatif en lecture lorsque les exercices portent uniquement sur la manipulation orale des unités phonologiques (Galushka et al., 2014 ; Joly-Pottuz, Mercier, Leynaud & Habib, 2008).

Ces recherches témoignent du lien étroit et bidirectionnel entre apprentissage de la lecture dans une langue alphabétique et développement de la conscience phonémique.

### Corrélatés cérébraux des traitements phonologiques

Lire un mot, une phrase ou un texte est une activité langagière qui mobilise, au sein de l'hémisphère gauche, un grand nombre de régions cérébrales également impliquées dans le traitement du langage oral (voir Figure 1). Ce large réseau cortical comprend aussi bien des régions sensorielles primaires impliquées dans le traitement de l'information auditive que des

régions largement intégratives impliquées dans le traitement du sens (Price, 2012). Nous verrons que l'activité de certaines de ces régions se modifie avec l'apprentissage de la lecture. Lire nécessite de traiter et de mettre en relation des informations visuelles et des informations auditives. De ce fait, la lecture mobilise des régions cérébrales impliquées dans le traitement de l'information auditive, notamment deux régions temporales gauches, le planum temporale et la partie postérieure du gyrus temporal supérieur.

Le planum temporale (prononcer planome temporalé) est une région temporale supérieure localisée postérieurement au gyrus de Heschl. Alors que le gyrus de Heschl traite les informations acoustiques quelle que soit leur nature (bruits, musique, langage), le planum temporale et les régions temporales postérieures qui lui sont adjacentes sont plus particulièrement impliquées dans le traitement des sons de la parole. Ces régions répondent plus spécifiquement aux différences acoustiques qui définissent des catégories phonémiques différentes (Chang, Rieger, Johnson et al., 2010). La prononciation d'un même phonème peut donner lieu à des signaux acoustiques variables selon le locuteur ou le contexte de production, mais d'autres variations acoustiques, parfois minimes, correspondent à des frontières phonémiques, si bien que le signal est perçu comme un phonème d'un côté de la frontière et comme un autre phonème au-delà. Grâce à leur sensibilité à ces frontières phonémiques, les régions temporales supérieures gauches contribuent à l'identification (/p/ dans /pa/) et à la discrimination (/p/ différent de /b/) des phonèmes. Elles appartiennent à un réseau périsylvien gauche plus large, incluant le gyrus frontal inférieur et le lobule pariétal inférieur (gyrus supramarginal et gyrus angulaire). Ce réseau est impliqué à la fois en lecture, dans les traitements phonologiques et dans la perception catégorielle des phonèmes (Dehaene-Lambertz et al., 2005 ; Deschamps, Baum & Gracco, 2014 ; Turkeltaub & Coslett, 2010).

Apprendre à lire entraîne des modifications structurelles et fonctionnelles des régions corticales impliquées en lecture, ce qui modifie la façon dont le cerveau traite l'information verbale (Kolinsky, Morais, Cohen et al., 2014). La comparaison entre illettrés et ex-illettrés (apprentissage tardif de la lecture) met en évidence des changements structurels au sein des régions temporales supérieures et du lobule pariétal inférieur : une plus grande densité de matière grise est observée dans ces régions après apprentissage de la lecture (Carreiras, Seghier, Baqero, et al., 2009). L'étude de participants adultes lettrés, illettrés ou ex-illettrés montre

que l'activité du planum temporale en situation d'écoute de phrases est d'autant plus forte que leur niveau de lecture est plus élevé (Dehaene, Cohen, Morais & Kolinsky, 2015). Chez l'enfant, les régions temporales supérieures sont plus activées lors de l'écoute d'énoncés verbaux après trois années d'apprentissage de la lecture que chez les débutants lecteurs (Monzalvo & Dehaene-Lambertz, 2013). En fait, des activations plus fortes du planum temporale et du gyrus supramarginal lors de l'écoute de phrases sont observées après seulement quelques mois d'apprentissage de la lecture.

Plusieurs méta-analyses montrent que les régions temporales supérieures, le lobule pariétal inférieur et le gyrus frontal inférieur sont moins activés chez les individus dyslexiques que chez les normo-lecteurs (Démonet et al., 2004 ; Richlan, Kronbichler & Wimmer, 2011). La sous-activation des régions temporo-pariétales gauches est notamment observée lorsque les personnes dyslexiques sont engagées dans des tâches de traitement phonologique (Hoeft, Hernandez, McMillon, et al., 2006 ; Paulesu, Danelli & Berlinger, 2014). Ces régions présentent une activation atypique aussi bien lors du traitement auditif des phonèmes que lorsque ceux-ci doivent être associés aux lettres correspondantes (Blomert, 2011). Les personnes dyslexiques montrent notamment un fonctionnement atypique du gyrus temporal supérieur lorsqu'ils doivent juger de la relation entre lettre et son. Chez les normo-lecteurs, les régions temporales supérieures sont plus fortement activées en réponse à des paires congruentes (lettre « A » associée au son /a/) que pour des paires non congruentes (A-/i/), ce qui n'est pas observé chez les participants dyslexiques. Ces résultats suggèrent une implication des régions périsylviennes gauches dans l'intégration audio-visuelle de l'information verbale. Un déficit de cette intégration est mis en évidence en contexte dyslexique.

Les études portant sur la remédiation des troubles dyslexiques et leur implication neuronale confirment l'implication des régions périsylviennes gauches dans les traitements phonologiques et l'apprentissage de la lecture (Temple, Deutsch, Poldrack et al., 2003). Simos et collaborateurs (2002) ont enregistré les activations cérébrales d'enfants dyslexiques avant et après entraînement. Les enfants dyslexiques recrutés présentaient tous un déficit phonologique avant entraînement. Leur activité cérébrale a été comparée à celle d'enfants normo-lecteurs alors qu'ils réalisaient une épreuve de jugement de rimes sous IRMf (voir Figure 2).

Avant entraînement, les enfants dyslexiques présentent une sous-activation du réseau péri-sylvien gauche. Contrairement aux normo-lecteurs, on observe notamment chez eux une hypo-activation du cortex temporal supérieur gauche (partie postérieure) qui s'accompagne d'une sur-activation des régions homologues de l'hémisphère droit.

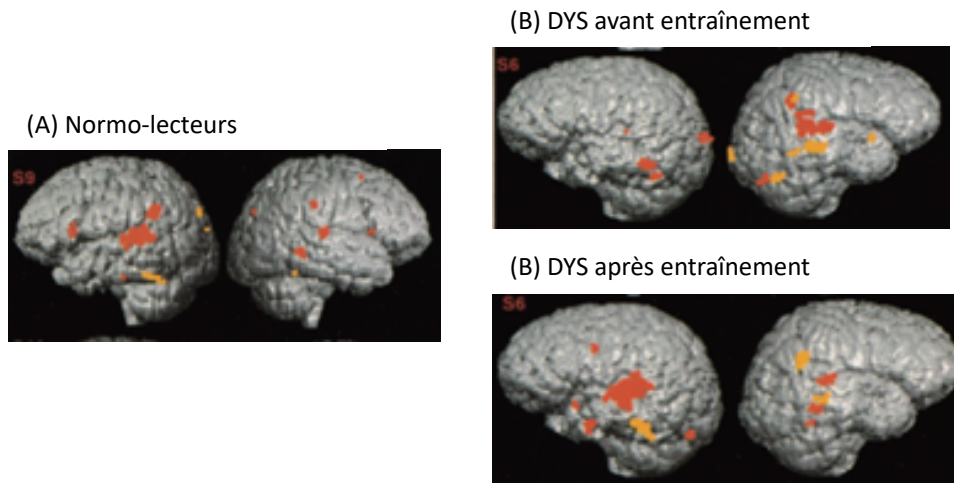


Figure 2 : Activation des aires péri-sylviennes lors d'une tâche de jugement de rimes effectuée sous IRMf par des enfants normo-lecteurs et dyslexiques, avant et après rééducation. (A) Enfant normo-lecteur : activation asymétrique en faveur de l'HG ; implication de régions du gyrus frontal inférieur, du lobule pariétal inférieur et du gyrus temporal supérieur ; (B) Enfant dyslexique avec déficit phonologique avant entraînement : asymétrie en faveur de l'hémisphère droit et sous-activation des régions péri-sylviennes gauche ; (C) Enfant dyslexique après entraînement : asymétrie en faveur de l'HG et réactivation du cortex temporal supérieur. (Tiré des Figures 1 et 3 de l'article de Simos 2002 ; Sujet 9 =normo-lecteur et sujet 6 =dyslexique)

Les enfants dyslexiques ont ensuite bénéficié d'un entraînement comportant des exercices de segmentation phonémique et de mise en relation des graphèmes et des phonèmes. L'entraînement était intensif ; il était effectué sur plusieurs séances étalées sur deux mois pour une durée totale de 80 heures. Après entraînement, les enfants présentent une amélioration de leur niveau de lecture, une plus forte asymétrie en faveur de l'hémisphère gauche et une réactivation des régions temporeles supérieures. Cette étude témoigne de l'implication des régions postérieures du réseau péri-sylvien gauche dans l'apprentissage de la lecture, pour ce qui concerne notamment les traitements phonologiques et la mise en relation des graphèmes et des phonèmes.

## Les dimensions visuelles de l'apprentissage de la lecture

Nous avons vu précédemment que l'apprentissage de la lecture mobilise un certain nombre de régions corticales, notamment les régions périsylviennes gauches, initialement impliquées dans le traitement de l'information auditive et du langage oral. L'activation de ces régions est modifiée par l'apprentissage de la lecture qui conduit notamment à développer des capacités d'identification des phonèmes et leur mise en relation avec les informations orthographiques correspondantes. En retour, l'ajustement des régions corticales périsylviennes gauches aux contraintes de la lecture modifie la façon dont le cerveau traite l'information auditive et le langage oral. Mais l'activité de lecture repose également sur les traitements visuels mis en jeu lors du traitement des mots écrits.

### Identification des lettres et discrimination des lettres en miroir

Le mot écrit est un objet visuel complexe dont le traitement représente un défi pour le système visuel de l'enfant. Les mots sont composés de lettres qui, elles-mêmes résultent de la combinaison de traits visuels (ex : trois traits visuels / – \ forment la lettre A). Plusieurs lettres de l'alphabet sont visuellement proches et ne se distinguent que par un ou un petit nombre de traits visuels (ex : E et F ou P et R), ce qui augmente la probabilité de les confondre. D'autres lettres ne se distinguent que par leur orientation, droite-gauche (d-b) ou haut-bas (f-t), une caractéristique visuelle qui va devenir incontournable pour leur identification. L'identification des lettres nécessite donc un ajustement des traitements visuels qui vont se spécialiser dans l'analyse des dimensions pertinentes à leur discrimination.

Dans la mesure où l'enfant pré-lecteur est capable de traiter son environnement visuel, on pourrait penser que son système visuel est suffisamment efficace pour traiter des mots écrits et identifier les lettres au sein de ces mots. De fait, une bonne acuité visuelle est un prérequis à l'apprentissage de la lecture, mais cela ne suffit pas. Les lettres sont des objets visuels très particuliers dont l'identification rapide repose sur un apprentissage perceptif visuel spécifique.

Lorsque l'enfant identifie une configuration visuelle donnée comme correspondant à une table par exemple, cette identification repose sur le traitement de la forme globale de l'objet

sans nécessiter d'analyse précise de ses éléments ; une table peut avoir un, trois ou quatre pieds, le plateau peut être plus ou moins grand et de forme variable, les pieds plus ou moins longs. Or, être capable de discriminer des lettres proches comme E - F ou n – h nécessite une analyse précise des traits qui forment ces lettres. L'apprentissage de la lecture va donc s'accompagner d'un apprentissage perceptif visuel permettant la discrimination des formes proches et l'intégration des traits en un tout immédiatement reconnaissable (Dehaene et al., 2015 ; Szwed, Ventura, Querido et al., 2012).

Le traitement des lettres en miroir représente un défi encore plus grand pour le débutant lecteur. En effet, les différences d'orientation droite-gauche ne changent en aucun cas l'identité des objets, des animaux ou des personnes. Un serpent arrivant de la gauche ou de la droite reste un serpent et la différence d'orientation n'est pas pertinente pour décider si nous sommes en danger. En l'occurrence, le système visuel humain s'est adapté pour identifier les éléments de son environnement naturel et l'identification de ces éléments ne nécessitait pas de traiter leur orientation. Ce principe d'invariance des formes en miroir est mis en défaut lors de l'apprentissage du code écrit (Dehaene, Nakamura, Jobert, et al., 2010). Le traitement de l'orientation va devoir s'affiner pour permettre une meilleure identification des lettres, ce qui va modifier plus largement la façon dont les lecteurs traitent les informations visuelles.

On peut démontrer l'impact de l'apprentissage de la lecture sur les traitements visuels, et notamment le traitement de l'orientation, en comparant les performances de personnes lettrées et illettrées. Dans des tâches de jugement d'identité nécessitant par exemple de dire si deux formes simples et symétriques, comme « ] » et « [ », sont identiques ou différentes, les adultes illettrés font beaucoup plus d'erreurs que les adultes lettrés, et ce même si la consigne met explicitement l'emphase sur l'orientation (Kolinsky, Verhaege, Fernandes et al., 2011). Il semble donc que les personnes illettrées démontrent une invariance de traitement aux formes en miroir, invariance qui n'est plus observée chez les personnes lettrées.

Si maintenant on demande à des groupes de sujets lettrés et illettrés de répondre « même » que les paires de stimuli visuels soient identiques (même identité et même orientation) ou en miroir et « différent » dans les autres cas, on observe que les temps de réponse sont plus longs en condition miroir qu'en condition identique chez les individus lettrés, même quand il s'agit de traiter des visages ou des objets (Pegado, Nakamura, Braga et al., 2014). Confrontés aux



mêmes stimuli, les individus illettrés traitent de la même façon les paires identiques et les paires en miroir. L'apprentissage de la lecture conduit donc à distinguer les représentations en miroir, au-delà du seul traitement des lettres. L'apprentissage de la lecture conduit donc à un ajustement du système visuel aux contraintes de la langue, cet ajustement modifie globalement les traitements visuels, qu'ils s'appliquent au traitement de lettres ou de tout autre type de stimulus.

### Identifier les lettres dans la séquence des mots

L'apprentissage de la lecture s'accompagne d'un ajustement du système visuel aux dimensions pertinentes pour la discrimination des lettres et leur identification rapide. Mais un traitement efficace des lettres isolées ne garantit pas qu'elles seront traitées efficacement dans la séquence du mot.

Plusieurs phénomènes modulent notre perception des lettres dans la séquence du mot (voir Figure 3). Deux de ces phénomènes, le gradient d'acuité et les interférences latérales (encombrement perceptif ou crowding) nuisent à l'identification des lettres. A cause du gradient d'acuité, la visibilité des lettres dans le mot est maximale au niveau du point de fixation mais les lettres sont de moins en moins visibles plus on s'éloigne de ce point. L'identification des lettres dans le mot est donc fonction de leur distance par rapport à la position du regard.

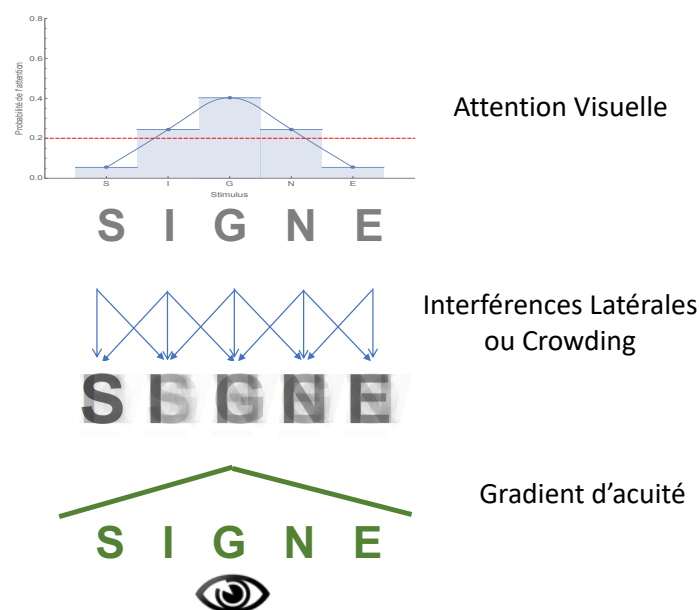
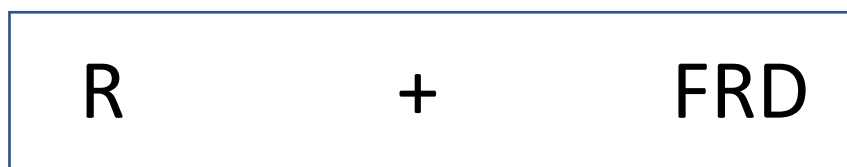


Figure 3 : Illustration des effets différentiels du gradient d'acuité, du crowding et de l'attention visuelle sur le traitement des séquences de lettres lorsque le regard fixe le centre du mot. Le gradient d'acuité induit une dégradation de la visibilité des lettres en fonction de l'excentricité ; les interférences latérales conduisent à mélanger les caractéristiques visuelles des lettres voisines, ce qui avantage la première et la dernière lettre qui n'ont qu'une lettre adjacente. La distribution gaussienne de l'attention visuelle conduit à allouer davantage d'attention sur la lettre fixée qui sera, de ce fait, mieux identifiée. La quantité d'attention allouée au traitement diminue symétriquement plus on s'éloigne du point de fixation.

Par ailleurs dans le mot, les lettres sont proches les unes des autres, ce qui met en jeu un autre phénomène, le phénomène d'interférence latérale ou crowding (Bouma, 1970 ; Pelli & Tillman, 2008). On peut facilement montrer l'effet de ce phénomène dans l'exemple suivant :



Si vous fixez la croix centrale, vous pourrez constater que le R est très facilement identifiable à gauche mais que celui de droite l'est beaucoup moins. Pourtant les deux R ont la même taille et sont à la même distance du point de fixation. A droite, le R souffre de la présence de lettres voisines qui interfèrent avec son identification. Ce phénomène est omniprésent en lecture. Les lettres se masquent entre elles à l'intérieur des mots, les mots entre eux dans la phrase et les phrases entre elles dans le texte.

Le degré d'interférence entre les lettres explique en partie la vitesse de lecture et la simple augmentation de l'espacement entre les lettres, si elle reste modérée, permet d'identifier les mots plus efficacement et de lire plus vite (Spinelli, De Luca, Judica & Zoccolotti, 2002 ; Martelli, Di Filippo, Spinelli & Zoccolotti, 2009 ; Zorzi et al., 2012). Un crowding excessif est décrit en contexte dyslexique, même si tous les enfants dyslexiques ne présentent pas de particularité à ce niveau (Gori & Facoetti, 2015). Le gradient d'acuité et les interférences latérales con-

duisent à une identification dégradée des lettres en séquence, ce qui devrait empêcher le traitement efficace des mots. Si ce traitement est néanmoins possible, c'est grâce à l'attention visuelle.

L'attention joue un rôle important en lecture (Bogon et al., 2014 ; Rayner, 2009 ; Waechter, Besner & Stolz, 2011). L'étude des mouvements des yeux pendant la lecture montre une succession de fixations et de saccades oculaires. Le lecteur pose son regard sur le mot à lire le temps d'une fixation, puis l'œil se déplace plus loin sur le même mot ou sur un autre mot, c'est la saccade. Lors de la fixation, l'attention visuelle se déploie autour de la position du regard, ce qui accroît la visibilité des lettres sous le focus attentionnel et facilite leur identification (Figure 4). Ensuite, l'attention se déplace sur une autre portion du mot ou de la phrase, ce qui déclenche le déplacement de l'œil.

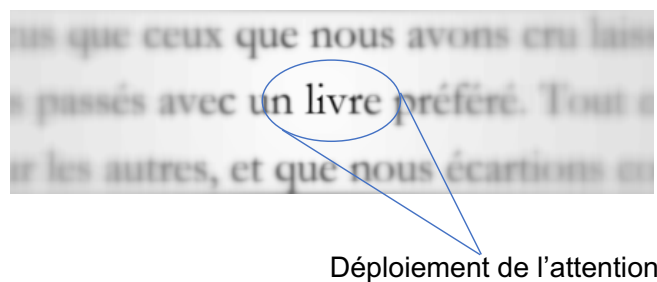


Figure 4 : Exemple du rôle de l'attention en lecture. L'ellipse délimite le champ de déploiement de l'attention lorsque le lecteur fixe la lettre « l » du mot LIVRE. Les ressources attentionnelles allouées aux lettres sur et autour du point de fixation les rendent plus nettement visibles et plus facilement identifiables. Les lettres hors du champ de déploiement attentionnel sont floutées du fait des effets combinés du gradient d'acuité et des interférences latérales.

L'attention visuelle joue un rôle de filtre, en favorisant le traitement des lettres sur lesquelles l'attention se déploie. Ces lettres sont perçues comme plus visibles que les lettres qui se situent hors du champ de focalisation attentionnelle. La capacité de traitement simultané de plusieurs lettres au cours de la fixation est donc partiellement fonction de la quantité d'attention visuelle dévolue au traitement et de la façon dont se distribue l'attention sur la séquence du mot (Meyer, Diard & Valdois, 2018).

## Attention visuelle et apprentissage de la lecture

On peut estimer les capacités d'attention visuelle déployées lors de la fixation par le biais d'épreuves qui requièrent le traitement simultané de plusieurs éléments. Le nombre d'éléments traités donne une mesure de l'empan visuo-attentionnel (VA ; Bosse et al., 2007) qui, elle-même, reflète la quantité de ressources attentionnelles déployée lors du traitement (Lobier, Dubois & Valdois, 2013). La présentation de séquences, ou configurations, de plusieurs éléments visuels (lettres, chiffres, pseudo-lettres, symboles) en un temps suffisamment court pour prévenir tout déplacement oculaire avec reprise d'information (<200ms), permet de mesurer les capacités d'empan visuo-attentionnel (VA) des enfants, à condition toutefois d'augmenter l'espacement entre les éléments à traiter de façon à éliminer toute influence du crowding. Des épreuves de report global et partiel de lettres ou de chiffres sont classiquement utilisées pour mesurer les capacités d'empan visuo-attentionnel (figure 5).

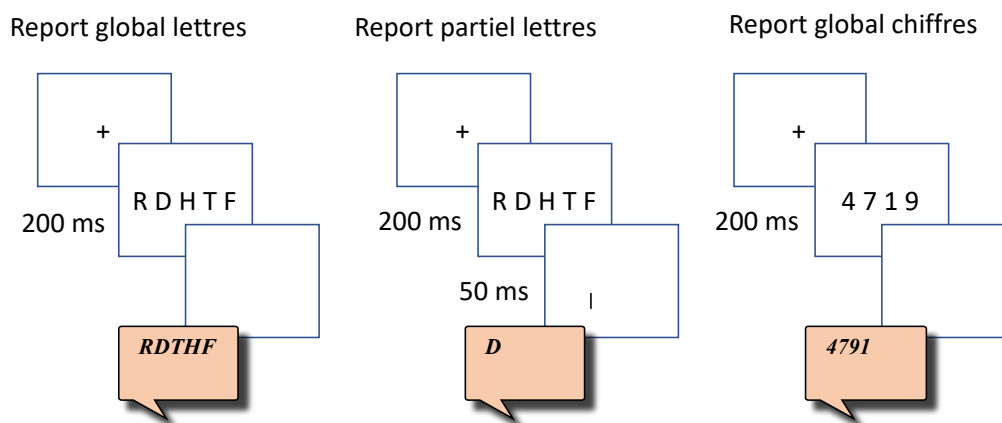


Figure 5 : Paradigmes classiquement utilisés pour estimer les capacités d'empan visuo-attentionnel en primaire pour les lettres et en maternelle, pour les chiffres. Épreuve de report global à 5 lettres (droite) ; Épreuve de report partiel à 5 lettres (milieu) ; version à 4 chiffres du report global (gauche). La réponse est orale ; on comptabilise le nombre de stimuli correctement identifiées (1 point par stimulus) même si l'ordre de rappel est différent. Toutes les réponses sont ici correctes.

L'empan visuo-attentionnel entretient un lien étroit avec l'apprentissage de la lecture. Bosse et Valdois (2009) ont mesuré les capacités d'empan visuo-attentionnel et de lecture chez plusieurs centaines d'enfants de primaire. Leurs résultats montrent que les enfants font d'autant moins d'erreur de lecture et qu'ils lisent d'autant plus vite que leur empan VA est plus élevé. L'empan VA contribue à rendre compte des performances en lecture dès la première année

d'apprentissage, indépendamment des capacités de traitement phonologique des enfants. Par ailleurs, la contribution de l'empan VA à la lecture reste très stable au cours du primaire (de la première à la cinquième année) alors que l'impact de la phonologie est fort en début d'apprentissage mais diminue ensuite rapidement. D'autres études soulignent notamment le lien entre capacités d'empan VA et vitesse de lecture (Antzaka, Lallier, Meyer, Diard et al., 2017 ; Lobier et al., 2013 ; van den Boer, de Jong & Haentjens-van Meeteren, 2013). L'impact de l'empan VA sur la lecture est mis en évidence aussi bien dans les études transversales où les deux aptitudes sont mesurées au même moment que dans les études longitudinales qui s'intéressent à l'impact de l'empan VA sur les performances futures de lecture.

L'existence d'un déficit de l'empan VA est largement documentée en contexte dyslexique (Bosse, Tainturier & Valdois, 2007 ; Valdois, Bosse, Ans et al., 2003 ; Valdois, Bidet-Ildei, Lassus-Sangosse et al., 2011), se traduisant par une réduction du nombre d'éléments visuels distincts qui peuvent être simultanément traités en une fixation unique. Les faibles capacités d'empan VA contribuent à expliquer le faible niveau de lecture des personnes dyslexiques. Cependant un déficit de l'empan VA n'est pas observé chez tous les enfants dyslexiques (voir Figure 6). Ce déficit ne caractérise qu'un sous-groupe d'enfants et il est préférentiellement décrit chez des enfants qui ne présentent pas de déficit de la conscience phonémique (Bosse et al., 2007 ; Germano, Reilhac, Capellini & Valdois, 2014 ; Zoubrinetzky et al., 2014, 2016). Le déficit de l'empan VA en contexte dyslexique est documenté dans un grand nombre de langues, incluant des langues non alphabétiques (anglais : Bosse et al., 2007 ; portugais : Germano et al., 2014 ; espagnol : Lallier, Acha & Carreiras, 2015 ; chinois : Zhao, Liu, Liu & Huang, 2018).

La question de la nature causale du lien entre empan VA et apprentissage de la lecture se pose inévitablement (Goswami, 2015 ; Lobier & Valdois, 2015). Est-ce que c'est le niveau d'empan VA qui détermine le niveau de lecture ou est-ce le niveau de lecture qui influence les capacités d'empan VA ? la nature causale de la relation entre empan VA et lecture impliquerait que l'empan VA mesuré chez les pré-lecteurs soit prédictif du niveau ultérieur des enfants en lecture. C'est bien ce qui est observé (Figure 6). Valdois et al. (2019) ont mesuré les capacités d'empan VA d'enfants de 5 ans (grande section de maternelle) par le biais de tâches de report. Des séquences de quatre chiffres étaient brièvement présentées et on demandait aux enfants

de dénommer soit tous les chiffres qu'ils avaient pu identifier soit un seul chiffre dont la position était indiquée par présentation d'une barre à la disparition de la séquence. Le niveau de lecture des enfants (vitesse de lecture de pseudo-mots et de mots irréguliers) était mesuré à la fin de l'année suivante. Les résultats montrent que l'empan VA mesuré en maternelle contribue à expliquer le niveau ultérieur de lecture des enfants. Cette relation reste significative même après contrôle des performances sur les autres prédicteurs de l'apprentissage de la lecture (connaissance du nom des lettres, mémoire à court terme, traitements phonologiques, QI).

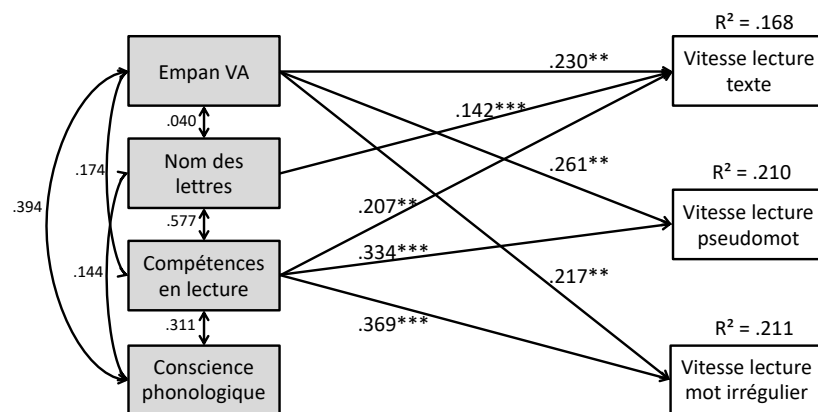


Figure 6 : Liens prédictifs entre les compétences cognitives mesurées en grande section de maternelle et les performances de lecture en fin de CP. La connaissance du nom de lettres, les connaissances précoces en lecture et l'empan VA sont des prédicteurs de la vitesse de lecture un an plus tard. La conscience phonologique mesurée en grande section est indirectement reliée aux performances de lecture. Adapté de Valdois, Roulin & Bosse (2019).

Un autre résultat fort à l'appui d'une relation causale consiste à démontrer que le niveau de lecture des enfants s'améliore suite à un entraînement intensif de l'empan VA. Deux études portant sur des enfants dyslexiques en témoignent. La première est une étude de cas (Valdois, Peyrin, Lassus-Sangosse et al., 2014) et l'entraînement proposé consistait en des exercices visuels suivant une progression spécifique (programme COREVA, Valdois, Bosse & Peyrin, 2017) ; la seconde est une étude de groupe (Zoubrinetzky et al., 2019) et l'entraînement consistait à utiliser un logiciel doté d'un algorithme adaptatif permettant un ajustement en temps réel du niveau de difficulté des exercices aux besoins de chaque enfant (logiciel MAEVA, Valdois et al. 2020). Dans les deux cas, l'entraînement proposé était intensif et les aptitudes de

lecture et d'empan VA étaient mesurées avant et après entraînement. Dans les deux cas, la comparaison pré-post entraînement montre non seulement une amélioration significative des capacités d'empan VA suite à l'entraînement mais également une amélioration significative des performances en lecture. Entraîner l'attention visuelle a donc des effets positifs sur la lecture.

### Corrélatés cérébraux des traitements visuels impliqués en lecture.

L'activité de lecture mobilise tout un ensemble de régions corticales impliquées dans le traitement de l'information visuelle (Dehaene, Cohen, Sigman & Vinckier, 2005). Ces régions s'organisent en un réseau ventral allant des aires visuelles primaires au cortex temporal inférieur gauche et un réseau dorsal allant des aires primaires au cortex pariétal supérieur (Boden & Giaschi, 2007). Nous avons vu précédemment qu'apprendre à lire nécessite un apprentissage perceptif visuel ; cet apprentissage se traduit par une plus forte activation des aires occipitales lors du traitement de stimuli visuels proches relevant d'une même catégorie et par une plus forte activation des régions occipito-temporales, au sein du réseau ventral gauche, lorsqu'il s'agit de traiter des formes en miroir (Pegado et al., 2014). L'ajustement de ces régions aux caractéristiques visuelles de la langue écrite afin d'assurer un traitement rapide et efficace des lettres et des mots modifie le traitement des informations visuelles en général, incluant le traitement de stimuli visuels sans lien avec la lecture, comme les visages ou les objets par exemple.

La lecture requiert également le traitement simultané des lettres qui composent les unités orthographiques pertinentes dans la langue. Lobier et collaborateurs (2012) ont montré que les lobules pariétaux supérieurs sont davantage activés lors du traitement simultané de plusieurs éléments visuels que lors du traitement d'un élément unique. Ces régions sont mobilisées aussi bien lors du traitement de lettres, que lorsqu'il s'agit de traiter d'autres types de stimuli, tels que des chiffres ou des symboles non familiers. Par ailleurs, le rôle des lobules pariétaux supérieurs est relativement spécifique puisque les régions voisines du cortex pariétal inférieur ne répondent pas à la présentation d'éléments multiples. Les lobules pariétaux supérieurs pourraient donc être impliqués dans le traitement simultané des lettres en lecture.

En accord avec cette hypothèse, l'étude de l'activité cérébrale de personnes dyslexiques présentant un déficit de l'empan VA montre une moindre activation des lobules pariétaux supérieurs chez ces patients comparativement à des normo-lecteurs (Lobier, Peyrin, Pichat et al., 2014 ; Peyrin, Demonet, Nguyen-Morel et al., 2011 ; Reilhac, Peyrin, Demonet & Valdois, 2013 ; Figure 7).

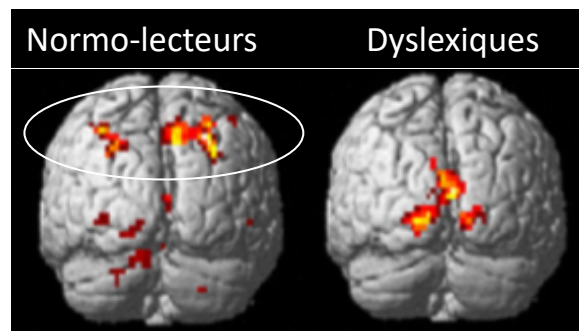


Figure 7 : Comparaison de l'activité cérébrale sous IRMf de sujets dyslexiques et normo-lecteurs lors du traitement simultané de plusieurs éléments visuels. À gauche : Activation forte des lobules pariétaux supérieurs bilatéralement chez les normo-lecteurs ; À droite : absence d'activation chez les dyslexiques ayant un déficit de l'empan VA. Figure adaptée de Peyrin et al. (2011), Figure 2.

La sous-activation des lobules pariétaux supérieurs est spécifiquement liée au déficit de l'empan VA. Peyrin et collaborateurs (2012) ont comparé l'activité cérébrale de deux jeunes adultes dyslexiques dont l'un présentait un déficit de l'empan VA dans le contexte d'une bonne conscience phonémique alors que l'autre présentait un déficit de la conscience phonémique mais des capacités préservées d'empan VA. Les deux participants ont effectué une tâche de jugement de rime et une tâche de catégorisation de stimuli visuels multiples sous IRMf. L'étude montre des activations cérébrales atypiques dans les deux cas, mais ces dysfonctionnements concernent des régions différentes selon le déficit cognitif du patient. Une sous-activation des lobules pariétaux supérieurs est retrouvée lors du traitement d'éléments visuels multiples, mais seulement chez le participant qui présente un déficit de l'empan VA. Une sous-activation des régions périsylviennes gauches ne caractérise que le patient dyslexique qui présente un déficit phonologique. Autrement dit, la double dissociation entre déficit phonologique et déficit de l'empan VA démontrée sur le plan cognitif se traduit par une



double dissociation au niveau neurobiologique. L'activation atypique des régions pariétales supérieures est un marqueur spécifique du déficit de l'empan VA.

La relation de dépendance entre empan VA et lobules pariétaux supérieurs est confortée par deux autres études. La première porte sur une patiente cérébrolésée ayant subi une lésion bilatérale des lobules pariétaux supérieurs à l'âge adulte après avoir développé des aptitudes normales en lecture (Valdois, Lassus, Lallier et al., 2019). Elle met en évidence un déficit massif du traitement simultané de plusieurs lettres caractéristique de l'empan VA alors que cette patiente ne présente aucun déficit de traitement sériel, lorsque des lettres sont présentées successivement, une à la fois. Le déficit de l'empan VA consécutif de l'atteinte des lobules pariétaux supérieurs est par ailleurs très spécifique puisque la patiente ne présente aucun déficit sur d'autres dimensions visuo-attentionnelles impliquant l'orientation ou le déplacement de l'attention visuelle.

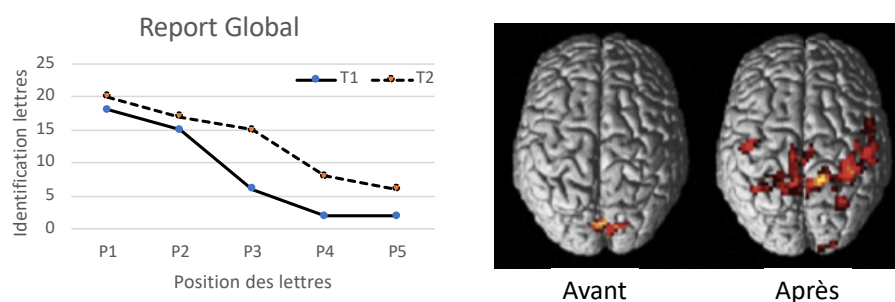


Figure 8 : Effet comportemental et neurobiologique d'une prise en charge intensive utilisant le programme COREVA chez une enfant dyslexique avec déficit de l'empan VA. A gauche : amélioration du nombre de lettres correctement identifiées en report global après entraînement (T2) comparativement à avant entraînement (T1). A droite : réactivation des régions pariétales bilatéralement suite à l'entraînement.

La seconde étude porte sur l'effet de l'entraînement chez une enfant présentant un déficit de l'empan VA dans le contexte d'une dyslexie développementale. Un programme intensif d'entraînement visuel et visuo-attentionnel a été proposé à cet enfant et des examens ont été effectués avant et après entraînement, incluant des mesures comportementales et un examen IRMf. Les résultats montrent un fonctionnement atypique des lobules pariétaux supérieurs

avant entraînement mais une augmentation importante de l'activation de ces régions après entraînement. La réactivation des lobules pariétaux supérieurs suite à l'entraînement s'accompagne d'une amélioration comportementale de l'empan VA et de meilleures performances en lecture.

## Acquisition des connaissances orthographiques lexicales

### Apprentissage incident par exposition aux mots en lecture

Dès la première année d'apprentissage de la lecture, l'enfant est exposé à des centaines voire des milliers de mots écrits. Ces mots vont faire l'objet d'un apprentissage incident. Les mots qui sont rencontrés fréquemment en lecture sont progressivement mémorisés sans que l'enfant en ait réellement conscience et sans qu'il fasse d'effort particulier pour mémoriser leur orthographe. Il n'est pas rare que les enseignants proposent des exercices spécifiques où ils demandent par exemple explicitement d'apprendre la forme orthographique de listes de mots. Un apprentissage explicite de ce type est efficace mais, en fait, l'orthographe de la plupart des mots est apprise en situation naturelle de lecture, sans intention d'apprendre.

Les études menées dans le cadre de la théorie de l'auto-apprentissage suggèrent que l'apprentissage orthographique incident est rapide. On peut montrer des effets d'apprentissage après seulement quelques expositions à un même mot nouveau en lecture. La mémorisation est d'autant meilleure que le mot a été rencontré plus souvent mais des effets d'apprentissage sont observés dès la première rencontre (Nation, Angel & Castels, 2007). Pour mieux comprendre l'apprentissage orthographique incident, plusieurs études ont enregistré les mouvements oculaires lors de la lecture répétée des mêmes mots nouveaux. Ces études montrent que les temps de lecture (temps total de fixation sur le mot) se réduisent quand le nombre d'exposition au mot augmente (Joseph, Wonnacott, Forbes & Nation, 2014). Les résultats suggèrent qu'une trace orthographique du mot est créée en mémoire suite à la première lecture et que cette trace se renforce lors des rencontres suivantes jusqu'à constitution d'une représentation orthographique stable du mot. L'existence d'une représentation mentale orthographique contribue à faciliter le traitement du mot lors des rencontres ultérieures, ce qui se traduit par des temps de traitement plus courts.

Mémoriser l'orthographe des mots au fur et à mesure qu'ils sont rencontrés à l'écrit a des conséquences majeures non seulement sur l'apprentissage de la lecture mais également sur

la production orthographique de l'enfant (Treiman, 2017). Le traitement d'un mot écrit est facilité lorsqu'une trace du mot est disponible en mémoire ; la trace mémorisée est activée à la présentation du mot écrit, ce qui facilite l'identification des lettres qui le composent et permet de le lire plus vite (c'est l'effet classique de supériorité du mot ; McClelland & Rumelhart, 1981). L'acquisition des connaissances orthographiques lexicales permet ainsi progressivement le passage d'une lecture lente et laborieuse à la reconnaissance rapide des mots précédemment rencontrés (Castles et al., 2018 ; Treiman, 2017).

La mémorisation des formes orthographiques lexicales se traduit également par des effets d'analogie qui peuvent être mis en évidence en lecture et en orthographe. On parle de traitement par analogie lorsqu'un mot nouveau est lu ou écrit par référence à un autre mot de la langue ; par exemple « chorate » lu /korate/ par analogie au mot « chorale » ou /daby/ écrit « dabut » par analogie au mot « début ». Bosse, Valdois & Tainturier (2003) ont montré que les enfants démontraient des capacités de traitement par analogie en production écrite dès le début de l'apprentissage de la lecture pour autant qu'ils aient rencontré les mots de référence et aient eu l'opportunité de les mémoriser.

La confrontation aux mots écrits et leur mémorisation permet également à l'enfant de développer une sensibilité aux régularités statistiques de la langue (Pacton, Foulon & Fayol, 2005 ; Pacton, Perruchet, Fayol & Cleeremans, 2001). Ils développent la connaissance implicite que certaines associations de lettres sont plus fréquentes que d'autres, même si cela ne fait pas l'objet d'un apprentissage explicite à l'école et même s'ils n'ont conscience ni de cet apprentissage ni de la connaissance qui en résulte. On sera tous d'accord que « ppafe » est un mot peu plausible en français alors que « paffe » ou « fappe » sont des formes possibles. Pourtant nous n'avons jamais appris que le doublement d'une consonne n'est pas possible en début de mot et nous n'en avons probablement pas conscience jusqu'ici. De la même façon, « fappe » est un meilleur exemplaire d'un mot possible en français que « fakke ». La mémorisation progressive des mots écrits rencontrés au cours des lectures permet ainsi non seulement l'acquisition de connaissances spécifiques sur l'orthographe particulière de chaque mot mais également le développement de connaissances orthographiques générales, transférables au traitement de mots nouveaux. Ces connaissances sont liées au développement d'une aire cérébrale particulière, l'aire de la forme visuelle des mots.

## Développement de l'aire de la forme visuelle des mots

Une partie du cortex ventral occipito-temporal gauche (Cohen, Lehericy, Chochon, et al., 2002 ; voir Figure 8) est systématiquement activée lors du traitement des mots et plus largement, en réponse aux séquences de lettres (Cohen, Dehaene, Naccache, et al., 2000 ; Dehaene et al., 2015). Étant donné son rôle en lecture, cette région est désignée sous le nom d'aire de la forme visuelle des mots (ou visual word form area, VWFA, en anglais). Dehaene et Cohen (2011) ont mesuré l'activation de la VWFA en réponse à la présentation de phrases écrites chez des adultes illettrés, lettrés et ex-illettrés. Ils montrent que cette région est d'autant plus activée que le niveau de lecture est plus élevé. En parallèle, l'exposition à d'autres types de stimuli (visages, maisons ou objets) entraîne au contraire une activation d'autant moins forte de la VWFA que le niveau de lecture augmente (Figure 9). Chez les adultes illettrés, cette partie du cortex ventral occipito-temporal gauche répond très préférentiellement aux visages et n'est pas activée par la présentation de mots écrits. Chez les ex-illettrés, elle commence à répondre aux séquences de lettres et le traitement des visages est en partie transféré à la région homologue de l'hémisphère droit. Enfin chez les lettrés, la réponse est très préférentiellement à gauche pour les séquences de lettres et très préférentiellement à droite pour les visages. Ce constat a conduit Dehaene et Cohen (2007) à proposer l'hypothèse de recyclage neuronal. Avant que l'humanité n'invente l'écriture, le cortex ventral occipito-temporal gauche était impliqué dans le traitement de stimuli visuels complexes, comme les visages, dont la reconnaissance est basée sur un traitement parallèle des traits qui les définissent (ex : bouche, yeux, nez ... pour les visages). Dans la mesure où les mots présentent les mêmes caractéristiques (e.g., stimuli complexes et traitement parallèle des lettres), cette région aurait été recyclée pour le traitement des séquences de lettres lorsque l'écriture est apparue.

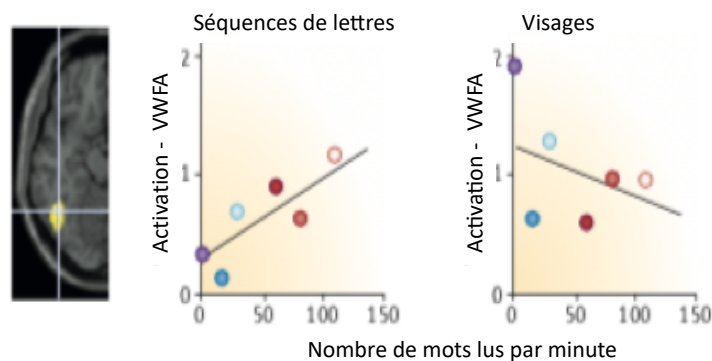


Figure 9 : Activation de la VWFA en fonction du niveau de lecture selon le type d'information visuelle à traiter, séquence de lettres ou visages. Le niveau de lecture mesuré en nombre de mots lus par minute correspond à des participants illettrés (mauve), ex-illettrés (bleu clair et foncé) et lettrés (rouge). L'activation de la VWFA est positivement corrélée au niveau de lecture lors du traitement des séquences de lettres. La corrélation est négative en condition de reconnaissance des visages. Adapté à partir de Dehaene et al. (2015), figure 1, partie C.

Dans la lignée des travaux précédents, on observe une activation de plus en plus forte de la VWFA au cours de l'apprentissage de la lecture (Shaywitz, Skudlarski, Holahan et al., 2007). Dans une étude récente, Dehaene-Lambertz et collaborateurs (2018) ont mesuré l'activation du cortex ventral occipito-temporal gauche chez de jeunes enfants qui passaient un examen IRMf tous les deux mois. Le premier examen était proposé avant l'entrée en CP alors que les enfants n'avaient pratiquement aucune connaissance en lecture, le dernier était effectué en fin de CP alors qu'ils avaient tous acquis le niveau de lecture attendu. Les enregistrements de l'activité cérébrale montrent l'absence de réponse du cortex ventral occipito-temporal gauche à la présentation de mots écrits lors des deux examens qui précèdent le début de l'apprentissage formel de la lecture. Par contre, un début d'activation de la VWFA est visible dès les tout premiers mois d'apprentissage de la lecture et cette activation augmente en intensité avec l'apprentissage. Une réponse spécifique aux mots émerge donc très rapidement au niveau du cortex ventral occipito-temporal gauche lors de l'apprentissage chez l'enfant.

L'effet de l'apprentissage sur la plasticité cérébrale du cortex temporal inférieur est également démontré chez l'adulte. Braga et collaborateurs (2017) ont suivi un adulte illettré pendant 24 mois au cours desquels des séances individuelles d'apprentissage de la lecture lui étaient régulièrement proposées à raison d'environ deux heures par semaine. Un examen IRMf était pratiqué tous les mois, le premier avant tout apprentissage de la lecture, le dernier alors qu'il était capable de décoder les mots. Le premier enregistrement de l'activité cérébrale, avant entraînement à la lecture, montre une activité uniquement occipitale lors de la présentation de mots écrits, caractéristique du traitement de tout stimulus visuel. On voit émerger l'activation de la VWFA seulement un mois après le début de l'apprentissage et cette activation augmente ensuite graduellement sur la période d'entraînement.

Ces études témoignent de la grande plasticité du cortex visuel occipito-temporal et de la rapidité avec laquelle la VWFA au sein du cortex ventral occipito-temporal gauche se spécialise dans le traitement des séquences de lettres lors de l'exposition à l'écrit chez le débutant lecteur.

Si la VWFA est d'autant plus activée que le niveau de lecture est plus élevé, on doit s'attendre à une sous-activation de cette région en cas de déficit en lecture. C'est ce qui est très systématiquement décrit. La sous-activation de la VWFA apparaît comme une constante en contexte dyslexique et un marqueur de la dyslexie quelle que soit la langue considérée (Paulesu et al., 2001, 2014 ; voir Figure 10).

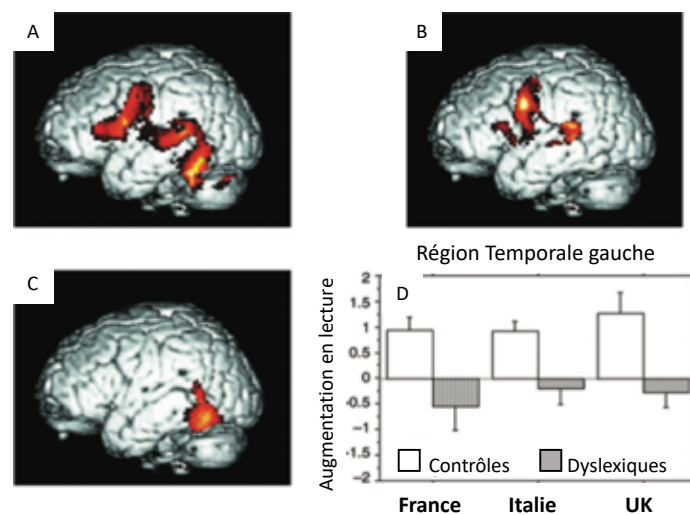


Figure 10 : Comparaison de l'activité cérébrale lors de la lecture de mots chez des adultes normo-lecteurs et dyslexiques de trois langues (français, italien et anglais). (A) Activations communes aux trois langues chez les normo-lecteurs ; implication des aires périsylviennes gauches et du cortex temporal inférieur ; (B) Activations chez les participants dyslexiques ; (C) Régions plus activées chez les normo-lecteurs que chez les dyslexiques : C'est le cortex temporal postérieur incluant la VWFA qui est systématiquement moins activé chez les DYS. (D) Comparaison de l'activité temporelle inférieure dans les trois langues montrant la sous-activation des régions temporales gauches chez les DYS quelle que soit leur langue. Adapté de la Figure 3 de Paulesu et al. (2001).

L'ensemble des études précédentes montre l'existence d'un lien fort entre apprentissage de la lecture et activation de la VWFA mais ce sont les études qui étudient l'impact des lésions de la VWFA sur l'activité de lecture qui nous informent plus directement sur le rôle de cette région dans la reconnaissance des mots écrits (Dehaene & Cohen, 2011). Certains cas d'épilepsie chronique peuvent nécessiter une intervention chirurgicale qui consiste en l'ablation de la région corticale correspondant au foyer épileptogène. Lorsque ce foyer se situe au niveau de la VWFA, ceci offre l'opportunité de mesurer le niveau de lecture avant et après ablation de la VWFA. C'est ce qu'ont fait Gaillard et collaborateurs (2006). Ils décrivent un changement majeur des performances de lecture suite à l'opération chez une patiente adulte. Avant l'opération, la lecture des mots était à la fois rapide (temps moyen de lecture = 650ms) et efficace (<10% d'erreurs). Suite à l'ablation de la VWFA, le temps de lecture est considérablement augmenté (2240ms en moyenne) et les erreurs nombreuses (58% en moyenne). Ce qui est par ailleurs frappant, c'est que la patiente pouvait lire tout aussi efficacement les mots de 3 lettres que les mots de 8 lettres avant l'opération, alors qu'un effet massif de longueur est observé suite à l'opération. Le temps de lecture et le nombre d'erreurs augmente d'autant plus que les mots sont plus longs.

L'ensemble de ces études suggère que la VWFA fonctionne comme une mémoire des connaissances orthographiques permettant la reconnaissance rapide des mots et le traitement parallèle des lettres qui les composent. Ces connaissances commencent à être mémorisées dès le tout début de l'apprentissage de la lecture et virtuellement dès les premières expositions aux mots. Elles continuent ensuite à s'enrichir au fur et à mesure de la confrontation aux mots écrits, ce qui permet progressivement à l'enfant de passer d'un traitement laborieux et analytique, qui pourrait être assuré par des régions plus postérieures du cortex ventral occipito-temporal gauche, à la reconnaissance immédiate des mots appris par activation de la VWFA.

### **Le réseau neurocognitif de l'apprentissage de la lecture**

Nous avons jusqu'ici tenté d'identifier les régions corticales impliquées en lecture et leur rôle respectif mais comprendre la lecture et son apprentissage implique surtout de mieux appré-

hender les interactions entre ces différentes régions et la dynamique de transmission d'information permettant de passer de l'analyse visuelle du mot, à sa production orale et à son sens. Dans cette dernière section, nous allons plus spécifiquement nous interroger sur les interactions entre le réseau « auditivo-verbal » périsylvien gauche, l'aire de la forme visuelle des mots et le réseau attentionnel dorsal, incluant les régions pariétales supérieures.

Nos connaissances quant à la connectivité intra-hémisphérique ont fortement progressé avec le développement de nouvelles techniques d'imagerie cérébrale comme la tractographie qui permettent d'étudier la neuroanatomie des faisceaux de matières blanches qui relient les différentes régions corticales. Ces recherches conduisent à décrire un réseau neuronal étendu de la lecture qui inclut non seulement les régions corticales impliquées en lecture mais également les faisceaux de fibres qui relient ces différentes régions (voir Figure 11). Les études de tractographie montrent que la VWFA est fortement interconnectée aux aires périsylviennes gauches impliquées dans le traitement du langage oral, via notamment le faisceau arqué (Wandell, Rauschecker & Yeatman, 2012).

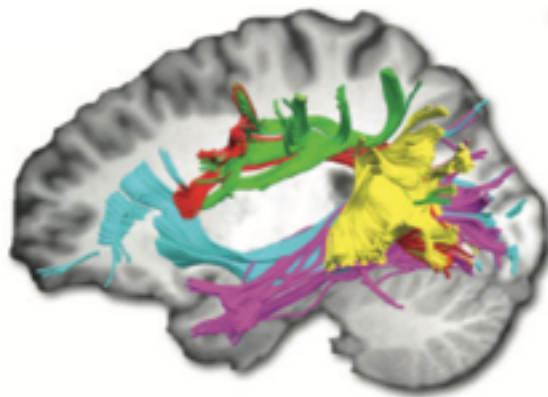


Figure 11 : Représentation de trois des principaux faisceaux reliant les régions corticales impliquées dans la lecture. Le faisceau arqué est représenté en jaune pour sa branche postérieure, en vert pour sa branche antérieure et en rouge pour sa branche longue. En bleu, le faisceau fronto-occipital inférieur ; en mauve, le faisceau longitudinal inférieur. (Figure 1A de l'article de Thiebaut de Schotten, Cohen, Amemiya et al., 2014)

Le faisceau arqué est un long faisceau de fibres qui dans sa branche postérieure relie la VWFA au lobule pariétal inférieur (gyrus angulaire et gyrus supra-marginal) et à la partie postérieure



des régions temporales supérieures, incluant le planum temporale. Plusieurs études suggèrent des changements anatomiques (densité des fibres, myélinisation ou taille des axones) dans cette partie du faisceau arqué avec l'apprentissage de la lecture, ce qui pourrait notamment se traduire par une transmission plus rapide des informations entre les aires visuelles et les aires auditivo-verbales (Thiebaut de Schotten et al., 2014). Cela favoriserait l'établissement des liens entre unités orthographiques et phonologiques qui sont indispensables à l'apprentissage de la lecture.

La partie longue antérieure du faisceau arqué relie les régions postérieures du gyrus temporal supérieur aux régions frontales inférieures, davantage impliquées dans l'articulation du langage, la mémoire à court terme, l'intégration sensori-motrice et les traitements phonologiques (Boets, 2014). Ces régions sont moins fortement connectées chez les personnes dyslexiques adultes que chez les normo-lecteurs (Boets, Op de Beeck, Vandermosten, Scott et al., 2013). Les études menées chez l'enfant montrent des corrélations entre la connectivité du faisceau arqué et le développement de la conscience phonémique (Yeatman, Dougherty, Rykhlevskaia et al., 2011). Globalement, les connexions entre les régions visuelles occipito-temporales (incluant la VWFA), les régions temporales supérieures au niveau du planum temporale et les régions frontales inférieures semblent assurer la mise en relation des informations visuelles, auditives et articulatoires nécessaires au développement de la conscience phonémique. Par ailleurs, le faisceau arqué facilite la transmission des informations auditivo-verbales qui sous-tendent la répétition. En répétition de pseudo-mots, de meilleures performances sont relatées chez le jeune enfant suite à l'apprentissage de la lecture (Nation & Hulme, 2011) et une plus forte activation des aires corticales est observée chez les adultes lettrés comparativement aux illettrés (Castro-Caldas, Petersson & Reis, 1998). L'ensemble des données actuellement disponibles suggère que l'apprentissage de la lecture s'accompagne d'un accroissement de la connectivité entre les régions visuo-orthographiques (notamment la VWFA) et les régions auditivo-verbales périsylvienne gauches, ce qui correspondrait sur le plan cognitif au développement de la conscience phonémique avec l'apprentissage et à la mise en relation des unités orthographiques et phonologiques.

Les études portant sur la connectivité intra-hémisphérique en lien avec l'apprentissage de la lecture se sont plus particulièrement intéressées aux relations entre la VWFA et les régions

périsylviennes gauches. Les données permettant d'appréhender la dynamique des interactions entre la VWFA et le réseau attentionnel dorsal, incluant le lobule pariétal supérieur, sont beaucoup plus éparses. Elles suggèrent néanmoins de fortes interactions et une complémentarité fonctionnelle entre ces structures.

Des interactions entre la VWFA et le réseau attentionnel dorsal ont été initialement mises en évidence dans des épreuves combinant traitement orthographique et traitement phonologique mais ce sont les traitements orthographiques qui mobilisent de façon privilégiée l'action conjointe de la VWFA et des régions pariétales supérieures. Van der Marck et collaborateurs (2011) montrent chez des enfants normo-lecteurs l'existence d'une connectivité fonctionnelle entre les régions ventrales occipito-temporales (VWFA et région postérieure adjacente) et les lobules pariétaux supérieurs bilatéralement lorsque les enfants réalisent une tâche de jugement phonologique sous IRMF nécessitant de décider si un pseudo-mot écrit se prononce comme un vrai mot, ou pas (Est-ce que « serize » se prononce comme un vrai mot ?). Lorsque la tâche proposée sous IRMF permet de distinguer traitement phonologique et traitement orthographique à partir de la présentation visuelle des mêmes items (ex : « sceau-sot » ou « bille-fille », deux mots qui riment ? ou deux mots orthographiquement similaires ?), des baisses d'activité avec l'âge sont observées au niveau périsylvien gauche lors des traitements phonologiques alors qu'une augmentation d'activité au niveau des lobules pariétaux supérieurs caractérise les traitements orthographiques (Cao, Lee, Shu, Yang et al., 2010). L'implication conjointe de la VWFA et du réseau attentionnel dorsal est d'ailleurs retrouvée dans des épreuves de comparaison de séquences de consonnes qui n'induisent pas de traitement phonologique (LTMHG – STMFG ; identique ou différent ? Reilhac et al., 2013). Toujours en accord avec l'implication préférentielle de ces régions dans les traitements visuo-orthographiques, l'activité conjointe de la VWFA et des lobules pariétaux supérieurs est observée lors du traitement de stimuli visuels non familiers et non verbalisables à partir du moment où la tâche implique le traitement simultané de plusieurs stimuli visuels différents (Lobier et al., 2014).

L'étude de la connectivité fonctionnelle à l'état de repos permet de s'affranchir des biais potentiels liés aux traitements cognitifs requis pour réaliser une tâche donnée. Ce qu'on mesure ici ce sont les variations d'activité observées à l'état de repos (en l'absence de tâche à réaliser). Cette méthode confirme les résultats des études précédentes. Elle met en évidence de fortes

interactions entre la VWFA et le réseau attentionnel dorsal et montre qu'une plus forte connectivité entre la VWFA et les lobules pariétaux supérieurs correspond à un meilleur niveau de lecture (Vogel, Miezin, Petersen & Schlaggar, 2011 ; Figure 12).

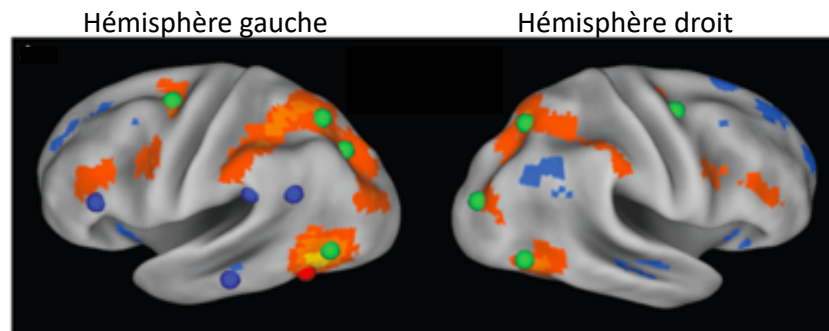


Figure 12 : Corrélation fonctionnelle entre la VWFA et les régions du réseau attentionnel dorsal résultant de la méta-analyse d'études portant sur la lecture de mots isolés. Les parties orangées correspondent aux régions cérébrales dont l'activation est corrélée positivement avec celle de la VWFA. Le point rouge à gauche correspond à la VWFA et les points verts aux régions du réseau attentionnel dorsal. Tiré de Vogel et al. (2011).

L'ensemble de ces résultats suggère que la VWFA et les régions pariétales supérieures sont impliquées conjointement dans le traitement des informations visuo-orthographiques. Dès lors, la question se pose de savoir si ces régions entretiennent une relation de coopération, assurant chacune des fonctions tout ou partiellement redondantes, ou si au contraire leur rôle est complémentaire. Cette deuxième option semble la plus probable dans la mesure où les activations pariétales sont observées dans des conditions particulières qui mettent en surcharge ou en défaut la VWFA. Cohen et collaborateurs (2008) ont demandé à des adultes normo-lecteurs de lire des mots qui étaient présentés sous un format classique ou dans un format progressivement dégradé (par rotation, translation ou espacement des lettres). Ils montrent que les régions pariétales et la VWFA sont toutes deux impliquées dans le traitement et toutes deux sensibles aux dégradations de format. Une plus forte dégradation entraîne une plus forte activation des portions plus postérieures de la VWFA qui seraient davantage mobilisées lors du traitement des lettres isolées. De la même façon, les régions pariétales sont d'autant plus activées que le format devient plus déviant, suggérant une implication d'autant plus forte de l'attention visuelle. Cela conduit à penser que la VWFA assure le traitement

automatique et parallèle des séquences familières de lettres lorsque le format est habituel. Un format fortement dégradé empêche le traitement parallèle du mot et conduit à un traitement plus local (niveau lettre ou graphème), ce qui s'accompagne de la mobilisation du réseau attentionnel dorsal. Le réseau dorsal pourrait être mobilisé pour permettre une meilleure identification des séquences de lettres sous contrôle de l'attention.

Les données recueillies par Gaillard et collaborateurs (2006) auprès de leur patiente épileptique avant et après ablation de la VWFA corroborent cette interprétation. Avant l'opération la patiente est capable de lire sans difficulté tous les mots qui lui sont présentés. Cela s'accompagne d'une forte activation de la VWFA, en l'absence d'activation des régions pariétales supérieures au sein du réseau attentionnel dorsal. La VWFA semble donc bien être seule impliquée dans le traitement parallèle des mots familiers dont elle assure la reconnaissance rapide. Après ablation de la VWFA, la lecture des mêmes mots entraîne une forte activation des régions pariétales supérieures, confirmant un engagement du réseau attentionnel dorsal lorsque le mot à traiter ne peut plus être reconnu comme familier.

Il semble donc que les lobules pariétaux supérieurs au sein du réseau attentionnel dorsal soient essentiellement mobilisés pour le traitement des séquences de lettres non familières, qui ne peuvent être prises en charge par la VWFA. Ce raisonnement appliqué à l'apprentissage de la lecture devrait conduire à observer de plus fortes activations des régions pariétales supérieures en début d'apprentissage lorsque la plupart des mots écrits ne sont pas encore familiers. Ceci semble être le cas ; en tout cas, c'est ce que suggère l'étude de l'émergence du réseau neuronal de la lecture lors du suivi longitudinal d'un adulte illettré avant et après le début de l'apprentissage de la lecture (Braga et al., 2017). Alors que la présentation de mots écrits avant apprentissage mobilise essentiellement les régions occipitales visuelles, une activation forte et bilatérale des régions s'étendant du gyrus occipital médian au lobule pariétal supérieur bilatéralement est observée à la présentation de mots lorsque débute l'apprentissage de la lecture.

L'avancée des connaissances sur l'émergence du réseau neuronal de la lecture au cours de l'apprentissage et sur les mécanismes cognitifs impliqués dans cet apprentissage conduit à réaffirmer l'importance majeure de la VWFA et de la mémorisation de connaissances ortho-

graphiques dans l'apprentissage de la lecture. Cet apprentissage mobilise, d'une part, un réseau ventral visuo-verbal qui relie les aires visuelles et la VWFA aux aires périsylviennes gauches pour assurer l'intégration des informations orthographiques et phonologiques et le développement de la conscience phonémique. Il mobilise, d'autre part, un réseau visuo-attentionnel dorsal qui relie la VWFA et les aires visuelles aux régions pariétales supérieures pour le traitement sous contrôle attentionnel des lettres du mot. Ce deuxième réseau serait plus particulièrement mobilisé lors du traitement des séquences non familières.

L'activation du réseau dorsal a été interprétée comme reflétant simplement soit des conditions plus difficiles de traitement qui requièrent un contrôle attentionnel soit le passage d'un traitement parallèle à un traitement sériel (Braga et al., 2017 ; Cohen et al., 2008). Cette interprétation ne cadre ni avec le rôle des lobules pariétaux supérieurs qui sont plus spécifiquement impliqués dans le traitement parallèle d'informations visuelles multiples (Lobier et al., 2012, 2014), ni avec les données pathologiques qui montrent que les enfants dyslexiques qui présentent une sous-activation des lobules pariétaux supérieurs développent des aptitudes de traitement sériel mais un déficit du traitement parallèle d'éléments visuels multiples (ou déficit de l'empan VA ; Bosse et al., 2007 ; Lobier et al., 2014). Par contre, l'ensemble de ces données devient très cohérent au regard des études expérimentales qui montrent que l'attention conjointement déployée sur plusieurs éléments est la condition nécessaire d'un apprentissage associatif conduisant à relier ensemble les éléments sous focalisation attentionnelle (Pacton & Perruchet, 2008).

Alors que la VWFA permet la reconnaissance rapide des mots familiers et que les régions temporo-occipitales postérieures qui lui sont adjacentes sont davantage impliquées dans le traitement des lettres isolées, le réseau attentionnel dorsal permettrait d'allouer l'attention nécessaire au traitement simultané de plusieurs lettres, permettant ainsi de mémoriser des unités de rang supérieur comme les graphèmes longs, les syllabes, ou les mots. Le rôle exact de ce réseau attentionnel dans l'apprentissage de la lecture et la façon dont il interagit avec la VWFA et le réseau visuo-verbal restent encore à préciser.

## 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.
- Blomert, L. (2011). The neural signature of orthographic-phonological binding in successful and failing reading development. *Neuroimage*, 57(3), 695-703.
- Boden, C. & Giaschi, D. (2007). M-stream deficits and reading-related visual processes in developmental dyslexia. *Psychological Bulletin*, 133 (2), 346-366.
- Boets, B. (2014). Dyslexia: Reconciling controversies within an integrative developmental perspective. *Trends in Cognitive Science*, 18 (10), 501-503.
- Boets, B., Op de Beeck, HP, Vandermosten, M. Scott, SK, Gillebert, C.R., Mantini, D., Bulthé, J., Sunaert, S., Wouters, J. & Ghesquière P. (2013). Intact but less accessible phonetic representations in adults with dyslexia, *Science*, 342, 1251-1254.
- Bogon, J., Finke, K. & Stenneken, P. (2014). TVA-based assessment of visual attentional functions in developmental dyslexia. *Frontiers in Psychology*, 5, 1172.
- Bosse, M. L., Tainturier, M. J. & Valdois, S. (2007). Developmental dyslexia: the visual attention span deficit hypothesis. *Cognition*, 104(2), 198-230.
- Bosse, M. L. & Valdois, S. (2009). Influence of the visual attention span on child reading performance: a cross-sectional study. *Journal of Research in Reading*, 32(2), 230-253.
- Bosse, M. L., Valdois, S. & Tainturier, M.J. (2003). Analogy without priming in early spelling development, *Reading and Writing*, 16, 693-716.
- Bouma, H. (1970). Interaction effects in parafoveal letter recognition. *Nature*, 226, 177
- Braga, L.W., Amemiya, E., Tauil, A., Suguieda, D., Lacerda, C., Klein, E., et al. (2017). Tracking adult literacy acquisition with functional MRI: A single-case Study. *Mind, Brain, and Education*. 11(3), 121–132.
- Bus, A. G. et van IJzendoorn, M. H. (1999). Phonological awareness and early reading: A meta-analysis of experimental training studies. *Journal of Educational Psychology*, 91(3), 403-414.
- Byalistok, E., Luk, G & Kwan, E. (2005). Bilingualism, biliteracy, and learning to read: Interactions among languages and writing systems. *Scientific Studies of Reading*, 9(1), 43-61.
- Cao, F., Lee, R., Shu, H., Yang, Y., Xu, G., Li, K. & Booth, J.R. (2010). Cultural Constraints on Brain Development: Evidence from a Developmental Study of Visual Word Processing in Mandarin Chinese. *Cerebral Cortex*, 20, 1223-1233.

- Caravolas, M., Lervåg, A., Mousikou, P., Efrim, C., Litavský, M., Onochie-Quintanilla, E., Salas, N., Schoffelova, M., Defior, S., Mikulajova, M., Seidlova-Malkova, G., & Hulme, C. (2012). Common patterns of prediction of literacy development in different alphabetic orthographies. *Psychological Science*, *23*, 678–686.
- Caravolas, M., Lervåg, A., Defior, S., Seidlová Málková, G., & Hulme, C. (2013). Different patterns, but equivalent predictors, of growth in reading in consistent and inconsistent orthographies. *Psychological Science*, *24*, 1398–1407.
- Carreiras, M., Seghier, M., Baquero, S. *et al.* (2009). An anatomical signature for literacy. *Nature*, *461*, 983-986.
- Castles, A., Rastle, K. & Nation, K. (2018). Ending the reading wars: Reading acquisition from novice to expert. *Psychological Science in the Public Interest*, *19*, 5–51.
- Castles, A. & Coltheart, M. (2004). Is there a causal link from phonological awareness to success in learning to read? *Cognition*, *91*(1), 77-111.
- Castles, A. & Nation, K. (2006). How does orthographic learning happen? In S. Andrews (Ed.), *From inkmarks to ideas: Challenges and controversies about word recognition and reading* (p. 151-179). London: Psychology Press.
- Castro-Caldas, A., Petersson, K.M., Reis, A., *et al.* (1998). The illiterate brain. Learning to read and write during childhood influences the functional organization of the adult brain. *Brain*, *121*, 1053-1063.
- Chang, E.F., Rieger, J.W., Johnson, K., *et al.* (2010). Categorical speech representation in human superior temporal gyrus. *Nature Neuroscience*, *13*, 1428-1432.
- Chevrot, J.P., Beaud, L. & Varga, R. (2000). Developmental data on a French sociolinguistic variable : post-consonantal word final /R/. *Language Variation and Change*, *12*, 295-319.
- Cohen, L., Lehericy, S., Chochon, F., Lemer, C., Rivaud, S., Dehaene, S. (2002). Language-specific tuning of visual cortex? Functional properties of the Visual Word Form Area. *Brain*. *125*, 1054–1069.
- Cohen, L., Dehaene, S., Naccache, L., Lehericy, S., Dehaene-Lambertz, G., Hénaff, M.A., *et al.* (2000). The visual word form area: spatial and temporal characterization of an initial stage of reading in normal subjects and posterior split-brain patients. *Brain*, *123*, 291-307.
- Cohen, L., Dehaene, S., Vinckier, F., Jobert, A. & Montavont, A. (2008). Reading normal and degraded words: Contribution of the dorsal and ventral visual pathways. *Neuroimage*, *40*(1), 353–366.
- Cunningham, A. E., Perry, K., Stanovich, K. E., & Share, D. L. (2002). Orthographic learning during reading: Examining the role of self-teaching. *Journal of Experimental Child Psychology*, *82*, 185–199.

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

Dehaene, S. & Cohen, L. (2011). The unique form of the visual word form area in reading. *Trends in Cognitive Science*, 15, 6, 254-262.

Dehaene, S., Cohen, L., Morais, J., & Kolinsky, R. (2015). Illiterate to literate: behavioural and cerebral changes induced by reading acquisition. *Nature Reviews Neuroscience*. 16(4), 234–44.

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

Dehaene, S., Nakamura, K., Jobert, A., Kuroki, C., Ogawa, S., & Cohen, L. (2010). Why do children make mirror errors in reading? Neural correlates of mirror invariance in the visual word form area. *NeuroImage*, 49, 1837-1848.

Dehaene-Lambertz, G., Pallier, C., Serniclaes, W., Sprenger-Charolles, L., Jobert, A., & Dehaene, S. (2005). Neural correlates of switching from auditory to speech perception. *NeuroImage*, 24, 21-33.

Dehaene-Lambertz, G., Monzalvo, K. & Dehaene, S. (2018). The emergence of the visual word form area: Longitudinal evolution of category specific ventral visual areas during reading acquisition. *PLoS Biology*, 16(3): e2004103.

Démonet, J. F., Taylor, M. J. et Chaix, Y. (2004). Developmental dyslexia. *Lancet*, 363(9419), 1451- 1460.

Deschamps, I. Baum, S.R. & Gracco, V.L. (2014). On the role of the supramarginal gyrus in phonological processing and verbal working memory: Evidence from rTMS studies. *Neuropsychologia*, 53, 39-46.

Duff, D., Tomblin, J.B. & Catts, H. (2015). The Influence of Reading on Vocabulary Growth: A Case for a Matthew Effect. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, 58, 3, 853-864.

Ehri, L. C. (2017). Orthographic mapping and literacy development revisited. In K. Cain, D. L. Compton, & R. K. Parrila (Eds.), *Theories of reading development* (pp. 169–190). Amsterdam, The Netherlands: John Benjamins.

Ehri, L. C., Nunes, S. R., Willows, D. M., Schuster, B. V., Yaghoub-Zadeh, Z. et Shanahan, T. (2001). Phonemic awareness instruction helps children learn to read: Evidence from the National Reading Panel's meta-analysis. *Reading Research Quarterly*, 36(3), 250-287.

Frith, U. (1985). Beneath the surface of developmental dyslexia. In K. Patterson, J. Marshall, & M. Coltheart (Eds.), *Surface dyslexia, neuropsychological and cognitive studies of phonological reading* (pp. 301–330). London, England: Erlbaum.



Gaillard, R., Naccache, L., Pinel, P., Clemenceau, S., Volle, E., Hasboun, D., et al. (2006). Direct intracranial, fMRI, and lesion evidence for the causal role of left inferior temporal cortex in reading. *Neuron*, 50 (2), 191–204.

Galuschka, K., Ise, E., Krick, K. et Schulte-Körne, G. (2014). Effectiveness of treatment approaches for children and adolescents with reading disabilities: a meta-analysis of randomized controlled trials. *PLoS One*, 9(2), e89900.

Germano, G. D., Reilhac, C., Capellini, S. A. et Valdois, S. (2014). The phonological and visual basis of developmental dyslexia in Brazilian Portuguese reading children. *Frontiers in Psychology*, 5, 1169.

Gori, S. & Facoetti, A. (2015). How the visual aspects can be crucial in reading acquisition? The intriguing case of crowding and developmental dyslexia. *Journal of Vision*, 15(1), 1-20.

Goswami, U. (2015). Sensory theories of developmental dyslexia: three challenges for research. *Nature Reviews Neuroscience*, 16(1), 43-54.

Hoefl, F., Hernandez, A., McMillon, G., Taylor-Hill, H., Martindale, J. L., Meyler, A., et al. (2006). Neural basis of dyslexia: a comparison between dyslexic and nondyslexic children equated for reading ability. *The Journal of Neuroscience*, 26(42), 10700-10708.

Joly-Pottuz, B., Mercier, M., Leynaud, A. et Habib, M. (2008). Combined auditory and articulatory training improves phonological deficit in children with dyslexia. *Neuropsychological Rehabilitation*, 18(4), 402-429.

Joseph, H. S., Wonnacott, E., Forbes, P., and Nation, K. (2014). Becoming a written word: Eye movements reveal order of acquisition effects following incidental exposure to new words during silent reading. *Cognition*, 133, 238–248.

Kolinsky, R., Morais, J., Cohen, L., Dehaene-Lambertz, G. & Dehaene, S. (2014). L'influence de l'apprentissage du langage écrit sur les aires du langage. *Revue de Neuropsychologie*, 6, 3, 173-181.

Kolinsky, K., Verhaege, A., Fernandes, T., Mangarda, E.J., Grimm-Cabral, L. & Morais, J. (2011). Enantiomorphy through the looking glass: Literacy effect on mirror image discrimination. *Journal of Experimental Psychology: General*, 140 (2): 210-238.

Laberge, D. & Samuels, S.J. (1974). Toward a theory of automatic information processing in reading. *Cognitive Psychology*, 3, 293–323.

Landerl, K., Freudenthaler, H.H., Heene, M., De Jong, P.F., Desrochers, A., Manolitsis, G., Parrila, R. & Georgiou, G.K. (2019). Phonological Awareness and Rapid Automated Naming as Longitudinal Predictors of Reading in Five Alphabetic Orthographies with Varying Degrees of Consistency. *Scientific Studies of Reading*, 23 (3), 220-234.

- Landerl, K., Ramus, F., Moll, K., Lyytinen, H., Leppänen, P. H. T., & Schulte-Körne, G. (2013). Predictors of developmental dyslexia in European orthographies with varying complexity. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 54, 686–694.
- Lobier, M., Dubois, M. et Valdois, S. (2013). The Role of Visual Processing Speed in Reading Speed Development. *PLoS One*, 8(4), e58097.
- Lobier, M., Peyrin, C., Le Bas, J. F. et Valdois, S. (2012). Pre-orthographic character string processing and parietal cortex: a role for visual attention in reading? *Neuropsychologia*, 50(9), 2195- 2204.
- Lobier, M., Peyrin, C., Pichat, C., Le Bas, J. F. et Valdois, S. (2014). Visual processing of multiple elements in the dyslexic brain: evidence for a superior parietal dysfunction. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 479.
- Lobier, M. & Valdois, S. (2015) Visual attention deficits in developmental dyslexia cannot be ascribed solely to poor reading experience. *Nature Reviews Neuroscience*, 16, 4, 225.
- Martelli, M., Di Filippo, G., Spinelli, D., & Zoccolotti, P. (2009). Crowding, reading, and developmental dyslexia. *Journal of Vision*, 9(4), 14, 1–18.
- McClelland, J. L., & Rumelhart, D. E. (1981). An interactive activation model of context effects in letter perception: I. An account of basic findings. *Psychological Review*, 88, 375-407.
- Melby-Lervåg, M., Lyster, S. A. H. & Hulme, C. (2012). Phonological skills and their role in learning to read: A meta-analytic review. *Psychological Bulletin*, 138(2), 322-352.
- Meyer, S., Diard, J. & Valdois, S. (2018). Lecteurs, votre attention s’il vous plaît ! Le rôle de l’attention visuelle en lecture. *A.N.A.E.*, 157, 697-705.
- Monzalvo, K. & Dehaene-Lambertz, G. (2013). How reading acquisition changes children’s spoken language network. *Brain and Language*, 127, 356–365.
- Morais, J. (1994). *L’art de Lire*. Editions Odile Jacob.
- Morais, J. (2016). *Lire, écrire et être libre : de l’alphabétisation à la démocratie*. Collection Odile Jacob.
- Morais J, Cary L, Alegria J, et al. (1979). Does awareness of speech as a sequence of phones arise spontaneously? *Cognition*, 7, 323-331.
- Nation, K., Angell, P., and Castles, A. (2007). Orthographic learning via self-teaching in children learning to read English: Effects of exposure, durability, and context. *Journal of Experimental Child Psychology* 96, 71–84.
- Nation, K. & Hulme., C. (2011). Learning to read changes children’s phonological skills: evidence from a latent variable longitudinal study of reading and nonword repetition. *Developmental Science*, 14 (4), 649-659.

National Reading Panel. (2000). *Teaching children to read: An evidence-based assessment of the scientific research literature on reading and its implications for reading instruction*. Washington, D.C.: National Institute of Child Health and Human Development.

Pacton, S., Foulin, J.N. & Fayol, M. (2005). L'apprentissage de l'orthographe lexicale. *Rééducation Orthophonique*, 222, 47-68.

Pacton, S., & Perruchet, P. (2008). An attention-based associative account of adjacent and nonadjacent dependency learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 34(1), 80–96.

Pacton, S., Perruchet, P., Fayol, M., & Cleeremans, A. (2001). Implicit learning out of the lab: The case of orthographic regularities. *Journal of Experimental Psychology: General*, 130(3), 401–426.

Paulesu, E., Danelli, L. et Berlinger, M. (2014). Reading the dyslexic brain: multiple dysfunctional routes revealed by a new meta-analysis of PET and fMRI activation studies. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 1.

Pegado, F., Nakamura, K., Braga, L., Ventura, P., Nunes, G., Jobert, A., Morais, J., Cohen, L., Kolinsky, R., & Dehaene, S. (2014). Literacy breaks mirror invariance for visual stimuli: a behavioral study with adult illiterates. *Journal of Experimental Psychology: General*, 143, 887-894. DOI: 10.1037/a0033198

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

Pelli, D.G., Tillman, K.A., Freeman, J., Su, M., Berger, T.D., & Majaj, N.J. (2007). Crowding and eccentricity determine reading rate. *Journal of vision*. 7, 2:20, 1-36.

Peyrin, C., Demonet, J. F., Nguyen-Morel, M. A., Le Bas, J. F. et Valdois, S. (2011). Superior parietal lobule dysfunction in a homogeneous group of dyslexic children with a visual attention span disorder. *Brain and Language*, 118(3), 128-138.

Peyrin, C., Lallier, M., Demonet, J. F., Pernet, C., Baciú, M., Le Bas, J. F., et al. (2012). Neural dissociation of phonological and visual attention span disorders in developmental dyslexia: fMRI evidence from two case reports. *Brain and Language*, 120(3), 381-394.

Price, C.J. (2012). A review and synthesis of the first 20 years of PET and fMRI studies of heard speech, spoken language and reading. *NeuroImage*, 62, 816-847.

Quinn, J.M., Wagner, R.K., Petscher, Y. & Lopez, D. (2015). Developmental Relations Between Vocabulary Knowledge and Reading Comprehension: A Latent Change Score Modeling Study. *Child Development*, 86, 1, 159–175.

Rayner, K. (2009). Eye movements and attention in reading, scene perception, and visual search. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 62(8), 1457-1506,

Read C, Zhang Y, Nie H, *et al.* (1986). The ability to manipulate speech sounds depends on knowing alphabetic reading. *Cognition*, 24, 31-44.

Reilhac, C., Peyrin, C., Demonet, J. F. et 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., Kronbichler, M. & Wimmer, H. (2011). Meta-analyzing brain dysfunctions in dyslexic children and adults. *NeuroImage*, 56, 1735-1742.

Rittle-Johnson, B. & Siegler, R.S. (1999). Learning to spell: Variability, choice and change in children's strategy use. *Child Development* 70, 332–348.

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

Share, D.L. (1995). Phonological recoding and self-teaching: Sine qua non of reading acquisition. *Cognition* 55, 151–218.

Share, D.L. (1999). Phonological recoding and orthographic learning: A direct test of the self-teaching hypothesis. *Journal of Experimental Child Psychology* 72, 95–129.

Share, D. L. (2004). Orthographic learning at a glance: On the time course and developmental onset of self-teaching. *Journal of Experimental Child Psychology*, 87, 267–298.

Shaywitz, B.A., Skudlarski, P., Holahan, J.M., Marchione, K.E., Constable, R.T., Fulbright, R.K., Zelterman, D., Lacadie, C. & Shaywitz, S.E. (2007). Age-related changes in reading systems of dyslexic children. *Annals of Neurology*, 61(4), 363-370.

Siegler, R. S. (1996) *Emerging minds: The process of change in children's thinking*. New York: Oxford University Press.

Simos, P. G., Fletcher, J. M., Bergman, E., Breier, J. I., Foorman, B. R., Castillo, E. M., *et al.* (2002). Dyslexia-specific brain activation profile becomes normal following successful remedial training. *Neurology*, 58(8), 1203-1213.

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

Stanovich, K. E. (1986). Matthew effects in reading: Some consequences of individual differences in the acquisition of literacy. *Reading Research Quarterly*, 21(4), 360–407.

Szwed, M., Ventura, P., Querido, L., Cohen, L. & Dehaene, S. (2012). Reading acquisition enhances an early visual process of contour integration. *Developmental Science*, 15, 139-149.

Temple, E., Deutsch, G. K., Poldrack, R. A., Miller, S. L., Tallal, P., Merzenich, M. M., *et al.* (2003). Neural deficits in children with dyslexia ameliorated by behavioral remediation: evidence from

functional MRI. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100(5), 2860-2865. doi: 10.1073/pnas.0030098100

Thiebaut de Schotten, M., Cohen, L., Amemiya, E., Braga, L.W. & Dehaene, S. (2014) Learning to read improves the structure of the arcuate fasciculus. *Cerebral Cortex*, 24, 989–995.

Torgesen, J. K., Alexander, A. W., Wagner, R. K., Rashotte, C. A., Voeller, K. K. et Conway, T. (2001). Intensive remedial instruction for children with severe reading disabilities: immediate and long-term outcomes from two instructional approaches. *Journal of Learning Disabilities*, 34(1), 33-78

Treiman, R. (2017). Learning to spell: phonology and beyond. *Cognitive Neuropsychology*, 34 (3-4), 83-93.

Turkeltaub, PE, Coslett, HB. 2010. Localization of sublexical speech perception components. *Brain Lang* 114(1):1–15.

Vaessen, A., Bertrand, D., Toth, D. Csépe, V., Faisca, L. & Reis, L. (2010). Cognitive development of fluent word reading does not qualitatively differ between transparent and opaque orthographies. *Journal of Educational Psychology*, 102 (4), 827-842.

Valdois, S., Bidet-Ildes, 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(10), 1197-1218.

Valdois, S., Bosse, M. L., Ans, B., Carbonnel, S., Zorman, M., David, D., et al. (2003). Phonological and visual processing deficits can dissociate in developmental dyslexia: Evidence from two case studies. *Reading and Writing: An Interdisciplinary Journal*, 16(6), 541-572.

Valdois, S., Bosse, M. L. et Peyrin, C. (2017). *COREVA : exercices progressifs d'entraînement des capacités d'empan visuo-attentionnel*. SBT Happyneuron, Lyon.

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

Valdois, S., Zoubrinetzky, R., Lobier, M. & Diard, J. (sous presse). MAEVA : un logiciel adaptatif d'entraînement de l'empan VA. SBT-Happy Neuron, Lyon.

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

Valdois, S, Roulin, JL & Bosse, ML (2019). Visual attention modulates reading acquisition. *Vision Research*, 165, 152-161.

- Van den Boer, M., de Jong, P. F. et 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 der Mark, S., Klaver, P., Bucher, K., Maurer, U., Schulz, E., Brem, S., et al. (2011). The left occipitotemporal system in reading: disruption of focal fMRI connectivity to left inferior frontal and inferior parietal language areas in children with dyslexia. *Neuroimage*, 54, 2426–2436.
- Vellutino, F. R., Fletcher, J. M., Snowling, M. J. et 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.
- Vogel, A. C., Miezin, F. M., Petersen, S. E., and Schlaggar, B. L. (2012). The putative visual word form area is functionally connected to the dorsal attention network. *Cerebral Cortex* 22, 537–549.
- 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.
- Wandell, B.A., Rauschecker, A.M. & Yeatman, J.D. (2012). Learning to see words. Annual review of Psychology, 10 (63), 31-53.
- Yeatman J.D., Dougherty R.F., Rykhlevskaia E., et al. (2011). Anatomical properties of the arcuate fasciculus predict phonological and reading skills in children. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23, 3304-3317.
- Zhao, J., Liu, M., Liu, H. & Huang, C. (2018). Increase deficit of visual attention span with development in Chinese children with developmental dyslexia. *Scientific Reports*, 8, 3153.
- Ziegler, J.C. & Goswami, U. (2005). Reading acquisition, developmental dyslexia and skilled reading across languages: A psycholinguistic grain size theory. *Psychological Bulletin*, 131, 1, 3-29.
- Zorzi, M., Barbiero, C., Facoetti, A., Lonciari, I., Carrozzi, M., Montico, M., ... Ziegler, J. C. (2012). Extra- large letter spacing improves reading in dyslexia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(28), 11455–11459.
- Zoubrinetzky, R., Bielle, F. et Valdois, S. (2014). New insights on developmental dyslexia subtypes: heterogeneity of mixed reading profiles. *PLoS One*, 9(6), e99337. doi: 10.1371/journal.pone.0099337
- 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.

Zoubinetzky, R., Collet, G.M., NGuyen-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.