4

Apport de la neuroimagerie à la compréhension des mécanismes impliqués dans l'apprentissage typique de la lecture et dans la dyslexie

Liliane Sprenger-Charolles
Laboratoire de Psychologie Cognitive (LPC) ; Brain & Language Research Institute (BRLI) ; Aix-Marseille-Université (IDEX-AMU)

Introduction

La finalité de la lecture est la compréhension [1] de ce qui est lu. Cependant, la plupart des difficultés d'apprentissage de la lecture s'expliquent non par des difficultés de compréhension, mais par des difficultés de décodage des mots écrits. C'est ce qu'indiquent les résultats des études effectuées depuis plusieurs années, d'abord dans les pays anglo-saxons, puis en France (voir pour une synthèse Sprenger-Charolles & Colé 2013a). Ces études signalent que, chez le lecteur débutant, le niveau de compréhension écrite est fortement lié au niveau de décodage, c'est-à-dire à la capacité de mettre en relation les graphèmes avec les phonèmes (Gentaz, Sprenger-Charolles & Theurel 2015). Par contre, chez celui qui sait bien décoder, il est fortement lié au niveau de compréhension orale tant sur le plan lexical (vocabulaire) que supra-lexical (compréhension d'énoncés ou de textes). D'autres études ont montré que les bons lecteurs lisent très rapidement les mots écrits, sans s'aider du contexte. Seule la maitrise d'automatismes à ce niveau permet au lecteur débutant d'atteindre un niveau de compréhension de l'écrit égal à celui de sa compréhension de l'oral. Le principal défi auquel est confronté un lecteur débutant qui maitrise la langue orale est donc d'automatiser le décodage, ce que les dyslexiques n'arrivent pas à faire.

1. Il existe plusieurs niveaux de compréhension : compréhension littérale, compréhension inférentielle (comprendre l'implicite) et compréhension évaluative ou critique. La compréhension d'un énoncé ou d'un texte (qu'il soit écrit ou oral) dépend plusieurs éléments, en particulier : de la nature de cet énoncé ou de ce texte (fréquence des mots, complexité syntaxique et sémantique, nombre d'informations implicites...) ; des connaissances linguistiques et des connaissances du monde du sujet lecteur ou auditeur ; de ses buts (par exemple, lire pour le plaisir ou pour trouver une information précise) ; du contexte (par exemple, un support imagé peut faciliter la compréhension d'un message écrit ou oral, alors qu'un environnement bruité est, de façon notoire, particulièrement nuisible à la compréhension orale)...

1. Mise en place des automatismes dans la lecture : de l'œil au cerveau

1.1 Au niveau de l'oeil

Les yeux fournissent le signal qui déclenche l'activité de lecture et l'enregistrement des mouvements oculaires est un moyen d'observation de cette activité. L'information captée par les yeux est dirigée vers la rétine (notre plaque photographique), qui n'a pas un pouvoir de discrimination identique dans toutes ses parties. En effet seule la fovéa assure la vision centrale, qui permet de distinguer avec précision les détails, en particulier les traits caractéristiques des lettres qui composent les mots. Or la fovéa n'occupe qu'une zone très limitée de la rétine et, au cours d'une fixation du regard, il n'est possible de voir de façon nette qu'une petite partie de ce qui est lu, environ une dizaine de caractères. Le comportement oculaire évolue toutefois avec l'expertise en lecture. En particulier le nombre moyen de fixations pour 100 mots diminue, mais même un adulte fixe pratiquement tous les mots (en moyenne, 94 sur 100). De plus la durée des fixations baisse progressivement, et elle se situe autour de 250ms chez les adultes, tout comme chez les enfants après trois à quatre ans d'apprentissage de la lecture (Starr & Rayner 2001). Ces résultats signalent que les procédures d'identification des mots écrits s'automatisent progressivement.

Pour percevoir les lettres, il faut aussi que l'enfant désapprenne certains comportements qu'il a acquis très tôt : l'invariance dans la perception des objets quelle que soit leur position. Ainsi alors qu'une chaise est une chaise, que son dossier soit à droite ou à gauche, 'b' ne se lit pas comme 'd', et 'les' ne se lit pas comme 'sel'.

1.2 Dans le cerveau

1.2.1 Une zone qui code spécifiquement les lettres et les mots

L'ordre des lettres est codé dans une région particulière du cerveau (Dehaene, Nakamura, Jobert *et al*. 2010) qui code aussi les mots. C'est ce que montrent plusieurs études qui ont utilisé des données de neuroimagerie pour voir *où* et *quand* se manifestent dans le cerveau les activations consécutives à la vision de mots.

Par exemple, Parviainen, Helenius, Poskiparta, Niemi et Salmelin (2006) ont utilisé la magnéto-encéphalographie (MEG)[2] avec des enfants ayant appris à lire depuis un an. Ces enfants voyaient soit des

2. La MEG mesure les champs magnétiques produits par l'activité électromagnétique des neurones. Ce système permet de cerner avec une bonne précision à la fois où (à quelques millimètres près) et quand (à quelques millisecondes près) le cerveau réagit dans la situation examinée.

items dits de *remplissage,* avec un animal, soit des items tests : un mot de 4 lettres ou une suite de 4 figures (triangle, carré, lozange, cercle). Ils devaient appuyer sur un bouton quand ils voyaient un animal.

Les résultats des analyses sur les items tests (Figure 1, partie gauche), indiquent que les aires occipitales sont activées bilatéralement pour les figures (a) mais uniquement à gauche pour les mots (b). La partie droite de cette figure présente la temporalité de ces activations pour les enfants (gris foncé) et pour des adultes qui ont passé le même test (gris clair). Les activations pour les figures se situent en moyenne autour de 100ms pour les adultes, comme pour les enfants. Par contre, il y a de fortes variations entre ces deux groupes pour les mots. En effet, les activations correspondant à la réponse occipitale gauche, qui sont pratiquement dans la même fenêtre temporelle que celles observées pour les figures chez les adultes, sont un peu plus tardives chez les enfants, tout en étant très rapides (entre 200 et 300ms).

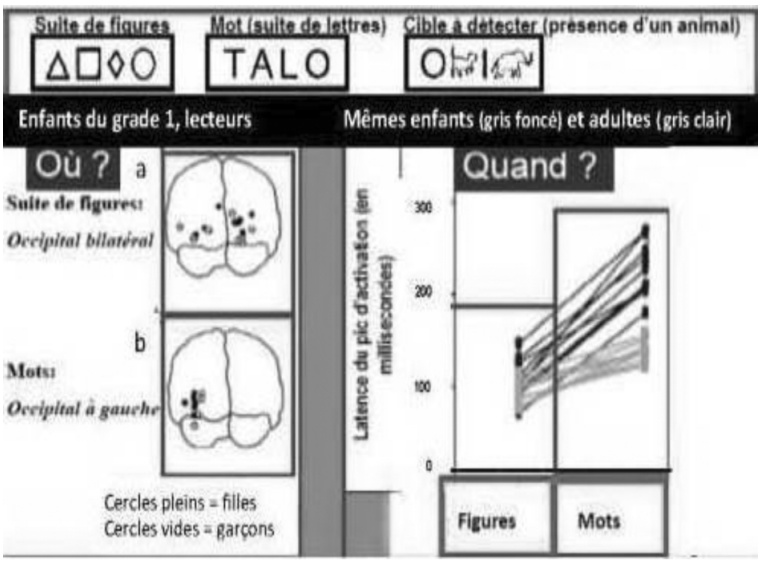

Figure 1. Aires activées par des figures ou par des mots chez des enfants après un an d'apprentissage de la lecture (à gauche) et (à droite) décours temporel des activations pour les enfants (gris foncé) et pour des adultes (gris clair). D'après Parviainen et al., 2006 (MEG)

Ces résultats indiquent que, après quelques mois d'apprentissage de la lecture, les enfants identifient les mots écrits en quelques millisecondes, ce qui est le signe d'un automatisme. Ils indiquent aussi que

cette identification s'effectue dans une partie spécifique du cerveau, une zone occipitale dédiée aux traitements visuels, mais uniquement à gauche.

1.2.2 L'hypothèse du recyclage neuronal induit par l'apprentissage de la lecture

Selon une hypothèse avancée par Cohen & Dehaene (2004), une partie de cette aire occipitale gauche a été *recyclée* pour traiter la forme visuelle des mots, d'où son appellation *visual word form area* (VWFA)[3]. L'idée d'un recyclage d'une zone cérébrale spécifique pour la lecture s'explique par le fait que cette activité est très récente dans l'histoire de l'humanité. La mise en place de cette nouvelle capacité a donc nécessité l'utilisation de certaines prédispositions de notre cerveau. Or la VWFA fait partie du gyrus fusiforme, connu pour traiter les informations visuelles fines, par exemple, celles impliquées dans la reconnaissance des visages et des formes géométiques. Cette aire pouvait donc être utilisée pour le traitement des lettres qui composent les mots. Le fait que seule la partie gauche de cette aire soit utilisée pour traiter les mots s'expliquerait par les connexions possibles avec les autres aires de l'hémisphère gauche dédiées au traitement du langage : les aires temporales et frontales avec lesquelles la VWFA va progressivement se connecter au cours de l'apprentissage de la lecture (Dehaene 2014).

1.2.3 L'effet de la lecture sur la VWFA

Avec l'amélioration du niveau de lecture, la VWFA devient de plus en plus activée par l'écrit et de moins en moins par d'autres stimulus. Ces résultats ont été relevés aussi bien chez des enfants qui apprennent à lire que chez des adultes qui ont été alphabétisés tardivement (pour une synthèse en français, v. Kolinsky, Morais, Cohen, Dehaene-Lambertz & Dehaene 2014).

L'importance de la VWFA pour la lecture ressort également d'études dans lesquelles les effets d'entrainement de cette compétence ont été évalués au niveau comportemental et cérébral. Une de ces études a montré que, chez l'adulte qui doit apprendre à lire avec un nouvel alphabet, le succès de cet apprentissage varie en fonction du mode de présentation. Ainsi, si on lui apprend que les mots sont composés de lettres qui représentent des sons élémentaires du langage parlé, il apprend plus rapidement à lire et l'imagerie cérébrale montre une activation normale de la VWFA. Ce n'est pas le cas si on lui présente les mêmes mots comme étant des formes globales (Yonche-

3. Cette hypothèse a pour point de départ l'observation de sujets chez lesquels la lecture est impossible suite à une détérioration de la VWFA (Cohen & Dehaene 2004).

va, Zevin, Maurer & McCandliss 2010). De plus, et ce point est également à mettre en relation avec les données comportementales qui ont montré l'importance du décodage dans l'acquisition de la lecture, il ne suffit pas d'exposer les enfants à l'écrit pour modifier le circuit cortical de la lecture. Il faut pour ce faire les forcer à utiliser les correspondances graphème-phonème (Brem, Bach, Kucian *et al*. 2010).

2. Impact de la transparence des correspondances graphème-phonème (CGP)

2.1 Dans l'apprentissage typique

Il est maintenant acquis que le recours au décodage (à l'utilisation des correspondances graphème-phonème, CGP) est un puissant mécanisme d'auto-apprentissage (pour une synthèse en français, voir Sprenger-Charolles & Colé 2013a). En effet, si les enfants utilisent d'abord le décodage, ils vont progressivement créer des relations stables entre certains graphèmes et certains phonèmes. L'établissement de ces relations dépend toutefois de la transparence des CGP dans la langue dans laquelle s'effectue cet apprentissage. Ainsi, les scores de décodage les plus bas s'observent chez les enfants anglais et les plus hauts chez les enfants espagnols qui ont appris à lire dans une langue dans laquelle les CGP sont soit peu régulières (l'anglais), soit très régulières (l'espagnol). Les scores des enfants français se situent entre ces deux extrêmes, tout comme les CGP en français [4], qui sont plus régulières qu'en anglais mais moins qu'en espagnol.

2.2 Dans la dyslexie

2.2.1 Qui sont les dyslexiques ?

Un enfant qui présente des difficultés d'apprentissage de la lecture n'est pas forcément dyslexique. En effet, ses difficultés peuvent avoir des origines diverses : une maitrise insuffisante de la langue, un environnement social peu stimulant ou une scolarisation non assidue. L'apprentissage de la lecture pose également des problèmes en cas de troubles psychologiques graves, de déficit intellectuel ou encore de déficiences sévères de l'acuité visuelle ou auditive. C'est seulement face à un déficit sévère d'apprentissage de la lecture, et après avoir éliminé les causes potentielles d'échec évoquées, que l'on peut parler de dyslexie.

---

4. Voir Peereman, Sprenger-Charolles & Messaoud-Galusi (2013) pour des données statistiques sur la régularité des CGP dans le lexique écrit adressé à l'enfant. Le corpus comprend les formes lexicales contenues dans 54 manuels du primaire, incluant les marques de flexion (environ 2 000 000 d'occurrences).

Selon une définition proposée par Lyon, Shaywitz & Shaywitz (2003) la dyslexie est un trouble des apprentissages qui a une origine neurologique. Elle se caractérise par des difficultés de précision et de rapidité dans la reconnaissance des mots écrits, des difficultés de décodage et d'orthographe. Ces difficultés, qui ont une origine phonologique, sont souvent inattendues étant donné les autres habiletés cognitives des dyslexiques et l'instruction qu'ils ont reçues. Les difficultés que rencontrent les dyslexiques pour comprendre les textes écrits ne sont qu'une conséquence secondaire de leurs difficultés de reconnaissance des mots écrits. Cette définition est utilisée, entre autres, par des associations comme l'IDA *(International Dyslexia Association)* qui regroupe les professionnels travaillant dans le domaine de la dyslexie (chercheurs et praticiens), les dyslexiques et les parents de dyslexiques.

2.2.2 Impact de la transparence des CGP sur les automatismes de lecture dans la dyslexie

L'incidence de l'opacité de l'orthographe sur les automatismes de lecture ressort d'une étude avec des adultes dyslexiques et des lecteurs typiques de même âge, anglais, français et italiens (Paulesu, Démonet, Fazio *et al*. 2001). L'analyse des temps de latence en lecture de mots et de pseudomots (c'est-à-dire du délai qui s'écoule entre l'apparition d'un item sur l'écran de l'ordinateur et le début de sa prononciation) indique que plus les CGP sont opaques, plus sévère est le déficit des dyslexiques. De façon surprenante, les scores des dyslexiques italiens se situent entre ceux des lecteurs typiques anglais et français. D'après ces données, la dyslexie parait n'être qu'une conséquence de l'opacité des CGP. Deux résultats permettent de rejeter cette explication : dans chaque groupe linguistique, d'une part, les scores de lecture des dyslexiques sont significativement plus faibles que ceux des lecteurs typiques et, d'autre part, cette différence est plus marquée en lecture de pseudomots qu'en lecture de mots, c'est-à-dire quand il faut lire en utilisant les CGP, sans pouvoir avoir recours à des connaissances lexicales. Ce dernier résultat, qui indique que le déficit en lecture des dyslexiques est de nature phonologique, est celui relevé dans la plupart des études avec des dyslexiques enfants, en français, comme en anglais (voir pour une méta-analyse, Sprenger-Charolles, Siegel, Jimenez & Ziegler 2011).

D'autres différences entre dyslexiques et lecteurs typiques ont été relevées au niveau cérébral dans l'étude de Paulesu *et al.* (2001). En effet, comme l'indique le haut de la figure 2, quelle que soit la langue dans laquelle ils lisent, les dyslexiques (seconde image) activent moins que les lecteurs typiques (première image) une zone spécifique

de leur cerveau, en l'occurrence une zone temporo-occipitale de l'hémisphère gauche qui correspond *grosso modo* à la zone traitant la forme visuelle des mots (troisième image). La partie basse de cette figure montre que ces hypo-activations sont relevées chez les dyslexiques quelle que soit la langue dans laquelle ils lisent. Par contre, et toujours quelle que soit la langue dans laquelle ils lisent, cette zone est activée chez les lecteurs typiques.

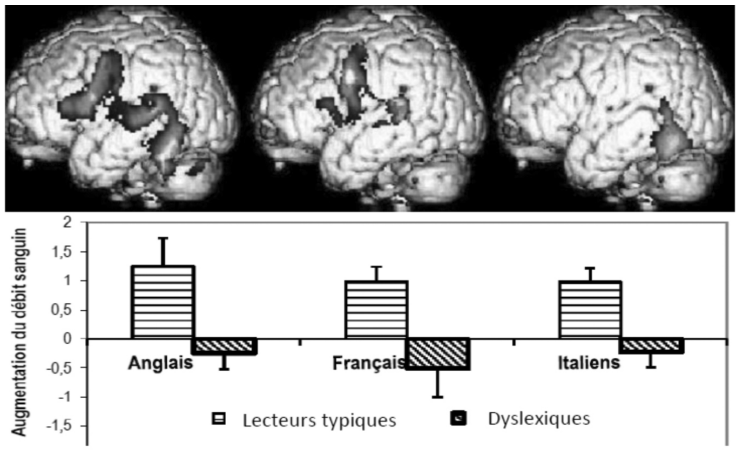

Figure 2. Activations relevées dans l'hémisphère gauche durant des tâches de lecture par des adultes lecteurs typiques (image 1) ou dyslexiques (image 2) et zone sous activée par les dyslexiques (image 3, soustraction des activations relevées chez les dyslexiques par rapport à celles des lecteurs typiques). Différences en fonction de la langue dans la zone sous activée chez les dyslexiques (en bas). D'après Paulesu et al., 2001 (TEP) [5].

3. Une nouvelle explication de la dyslexie : déficit de perception des phonèmes

Pour mettre en relation les graphèmes avec les phonèmes correspondants, il faut non seulement pouvoir isoler les phonèmes, il faut également bien les discriminer. Si de nombreux travaux ont porté sur les liens entre l'apprentissage de la lecture et la première capacité (évaluée par des tâches de comptage ou de suppression de phonèmes),

5. La TEP repose sur la détection des rayonnements associés aux positons (particules élémentaires de même masse que l'électron et de charge positive). Ces rayonnements sont produits par une substance radioactive administrée au patient. La TEP permet de mesurer l'activité du cerveau (en examinant, par exemple, les changements de débit sanguin) pendant une tâche. La résolution spatiale de cette technique est fine (4 à 7 millimètres). Par contre, sa résolution temporelle est faible (quelques secondes).

peu ont examiné l'incidence des capacités de discrimination des phonèmes sur cet apprentissage (voir pour une synthèse Serniclaes & Sprenger-Charolles 2015)[6]. Or le phonème est le résultat d'un découpage arbitraire : en effet dans un *continuum* acoustique, on catégorise, ce qui veut dire que l'on perçoit toute une gamme de sons acoustiquement différents comme /p/ et d'autres comme /t/ ou /k/. La perception catégorielle réside dans le fait que, à différence acoustique égale, deux sons différents mais de la même catégorie phonémique (deux variantes de /ba/, ou allophones) sont moins bien discriminés que deux sons différents appartenant à des catégories phonémiques différentes (/ba/ et /da/, voir Liberman, Cooper, Shankweiler & Studdert-Kennedy 1967).

La figure 3 illustre la méthodologie utilisée dans les études présentées dans cette partie. Les sujets entendent deux paires identiques ou deux paires différentes. Par exemple, pour les paires différentes intra-catégorielles : ba1-ba2, ba2-ba1, da1-da2, da2-da1 et, pour les paires différentes inter-catégorielles, ba2-da1, da1-ba2. Ils doivent dire si les deux stimuli sont ou non identiques. Si un sujet perçoit ce qui est différent sur le plan acoustique, tout comme s'il répond au hasard, son score devrait être de 50 % de réponses correctes dans toutes les situations. Toutefois, si sa perception est catégorielle, son score devrait être au-dessus de 50 % pour la paire inter-catégorielle et juste à ce seuil pour les paires intra-catégorielles.

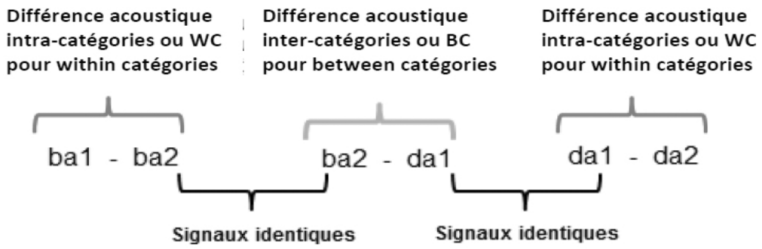

Figure 3.

3.1 Déficit de perception catégorielle chez les dyslexiques

Les scores obtenus pour deux variantes de /ba/ et deux variantes de /da/ par des lecteurs typiques et des dyslexiques de 13 ans sont

6. Voir toutefois Piquard-Kipffer et Sprenger-Charolles (2013) qui ont examiné l'impact sur le niveau de lecture à 8 ans des capacités précoces de discrimination phonémique évaluées à 5 ans avec une tâche utilisant des paires d'items qui ne différaient que par un phonème (sans manipulation des différences acoustiques).

présentés dans la figure 4 (Serniclaes, Sprenger-Charolles, Carré & Démonet 2001). Comme attendu, la perception est catégorielle : les scores sont en effet au-dessus de 50 % pour la paire inter-catégorielle et juste à ce seuil pour les paires intra-catégorielles et ce aussi bien chez les lecteurs typiques que chez les dyslexiques. Chez ces derniers toutefois le pic à la frontière catégorielle est de moins forte amplitude que celui relevé chez les lecteurs typiques. De plus, les dyslexiques discriminent mieux que les lecteurs typiques les paires intra-catégorielles, c'est-à-dire les allophones d'un même phonème. Ainsi alors que les scores des lecteurs typiques sont au hasard pour les deux /da/, ceux des dyslexiques sont 10 % au-dessus du hasard (voir pour d'autres résultats en français sur cette question, Bogliotti, Serniclaes, Messaoud-Galusi & Sprenger-Charolles 2008 et pour une synthèse, Noordenbos & Serniclaes, 2015).

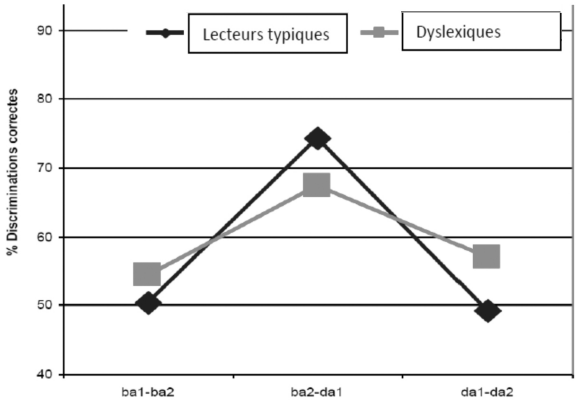

Figure 4. Discriminations correctes (%) selon la condition (inter-catégorie et intra-catégorie) chez des dyslexiques et des lecteurs typiques de 13 ans. D'après Serniclaes et al. 2001.

Ces déficits subtils peuvent avoir une incidence sur l'utilisation de la procédure de lecture qui s'appuie sur les correspondances graphème-phonème. En effet, une moins bonne discrimination de phonèmes différents accompagnée par une meilleure discrimination d'allophones d'un même phonème peut entraver l'utilisation de cette procédure.

3.2 Ce déficit est-il spécifique au traitement des sons de la parole ?

3.2.1 Etudes comportementales avec des lecteurs typiques et des dyslexiques

La spécificité linguistique du déficit de perception catégorielle a été testée en comportemental dans différentes études en utilisant des sons verbaux et non verbaux aussi proches que possible avec des dyslexiques et des lecteurs typiques (Rosen & Manganari 2001, Serniclaes *et al*. 2001). Cette question a aussi été examinée avec des lecteurs qui avaient un retard de lecture peu sévère (environ 6 mois), ce qui ne permet pas de les classer comme dyslexiques (Mody, Studdert-Kennedy & Brady 1998). Ces études indiquent que le déficit des dyslexiques, comme celui des faibles lecteurs, est spécifique au traitement des sons de la parole.

L'originalité de l'étude de Serniclaes *et al*. (2001) réside dans l'utilisation des mêmes stimuli en condition parole et en condition non-parole : des analogues sinusoïdaux de sons de parole variant le long d'un continuum de lieu d'articulation de /ba/ à /da/. Ces sons, qu'un auditeur naïf ne perçoit pas comme étant des sons de la parole, ont été présentés par paire, d'abord en condition non-parole, puis en condition parole. Dans la première condition, l'expérimentateur précisait que ces sons étaient des sifflements et, dans la seconde, qu'il s'agissait des syllabes 'ba' ou 'da'. Dans les deux conditions, le sujet devait dire si les deux sons qu'il entendait étaient ou non identiques. Si une différence est observée seulement en condition parole, il est alors possible de l'attribuer à des traitements spécifiques au langage. En plus de l'étude comportementale de Serniclaes *et al*. (2001) avec des dyslexiques et des lecteurs typiques de 13 ans, ce protocole a été utilisé dans des études de neuroimagerie avec des adultes sains (Dehaene-Lambertz, Pallier, Serniclaes *et al*. 2005) et des dyslexiques (Dufor, Serniclaes, Sprenger-Charolles & Démonet 2007 et 2009).

3.2.2 Etudes comportementales et de neuroimagerie avec des adultes sains

Les résultats obtenus en comportemental dans l'étude de Dehaene-Lambertz *et al*. (2005) sont présentés dans le bas de la figure 5. Plus précisément, sont notées dans cette figure les différences entre les réponses pour les paires inter-catégories (ba-da) comparativement aux paires intra-catégories pour les 150 premiers essais et les 150 suivants pour chaque condition (1 et 2 pour la condition non-parole ; 3 et 4 pour la condition parole). On relève un changement notable entre la condition non-parole et la condition parole. En effet, ce n'est qu'en condition parole que les sujets perçoivent mieux les différences pour les paires inter-catégories que pour celles intra-catégories. Ce résultat ne peut pas s'expliquer par un effet d'apprentissage provenant de ce

que la condition parole est toujours présentée après la condition non-parole. En effet, il n'y a pas d'amélioration des scores entre la première et la seconde série d'essais dans chaque condition.

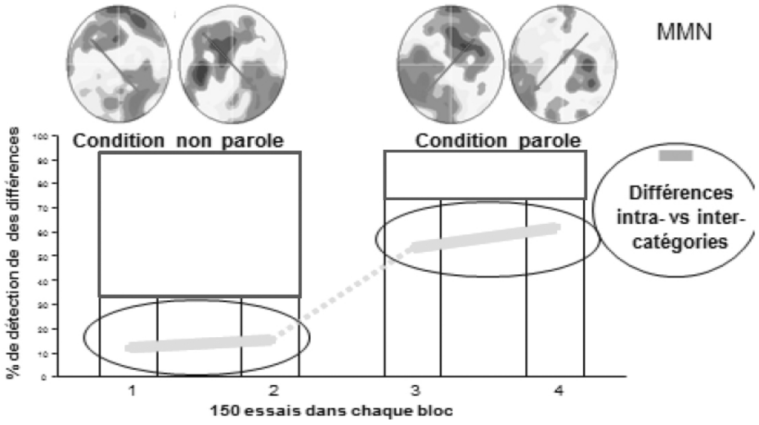

*Figure 5. Réponses comportementales (en bas) et corticales (en haut) de sujets adultes sains selon la condition (non-paroles et parole) et les essais (les 150 premiers et les 150 suivants dans chaque condition : 1-2 et 3-4)***.** *D'après Dehaene-Lambertz et al. 2005 (Potentiels évoqués)***.**

La figure 5 présente également les résultats obtenus en électrophysiologie [7]. Ces résultats vont dans le même sens que ceux observés en comportemental. En effet, la réponse électro-physiologique se modifie en fonction du mode de perception, avec un basculement du dipôle. Ainsi, la positivité qui était sur la région temporale droite en mode acoustique passe à gauche en mode linguistique. De même la négativité frontale initialement gauche bascule à droite en mode linguistique. Comme précédemment, cela ne peut pas être attribué à un effet d'apprentissage puisque le basculement s'effectue au moment où la perception devient catégorielle d'après les résultats relevés en comportemental.

D'autres résultats importants, qui ressortent des données d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) [8] de l'étude de

7. Cette technique permet de mesurer les champs électriques produits par l'activité des neurones. Ce système permet de cerner avec une bonne précision temporelle (à quelques millisecondes près) comment le cerveau réagit dans la situation examinée. La résolution spatiale est par contre moins bonne.

8. L'IRMf permet de mesurer l'activité du cerveau en examinant les changements de débit sanguin pendant une tâche. La résolution spatiale de cette technique est fine (quelques millimètres), mais pas sa résolution temporelle (plusieurs secondes).

Dehaene-Lambertz *et al*. (2005) sont présentés dans la figure 6. Ces résultats montrent un remarquable partage du travail dans le cerveau gauche. En effet, deux zones (le thalamus et l'insula) réagissent aux différences acoustiques entre les stimulus, quelles qu'elles soient : deux /ba/ différents ou /ba/ *versus* /da/ (A). Une troisième zone réagit spécifiquement aux différences entre condition parole et non-parole, le sulcus temporal supérieur (B). Par contre, une quatrième zone, le gyrus supra-marginal, est spécifiquement activée en condition parole pour le traitement des différences phonologiques, c'est-à-dire pour la paire inter-catégorie /ba/ *versus* /da/ (C).

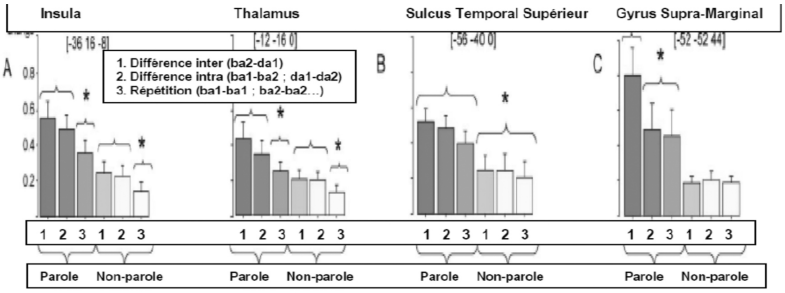

Figure 6. Activations relevées chez des adultes sains dans 4 zones d'intérêt de l'hémisphère gauche selon la condition (non-parole et parole) et la nature des stimulus (inter-catégories, intra-catégories, répétition). D'après Dehaene-Lambertz et al., 2005 (IRMf).

3.2.3 Données de neuroimagerie avec des lecteurs typiques et des dyslexiques

Le même protocole a été utilisé dans une étude de neuroimagerie avec des adultes lecteurs typiques et des dyslexiques (Dufor, Serniclaes, Sprenger-Charolles & Démonet 2007 et 2009). Ces deux études ont utilisé la tomographie par émission de positons (TEP), technique qui, à la différence de l'IRMf, n'engendre pas de bruit. Les résultats de l'étude de 2007 sont présentés dans la figure 7.

Dans l'étude de Dufor *et al.* (2007), la principale différence entre les groupes s'observe pour les activations du girus supra-marginal gauche, zone qui, dans l'étude de Dehaene-Lambertz *et al*. (2005), était spécifiquement activée par les différences inter-catégorielles en condition parole chez des adultes sains. En effet, comme l'indique la figure 7, les lecteurs typiques, mais pas les dyslexiques, activent plus fortement le girus supra-marginal en condition parole qu'en condition non-parole.

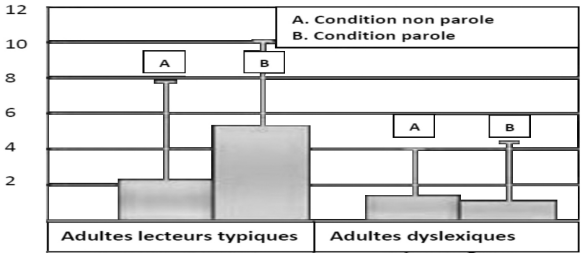

Figure 7. Activation du gyrus supra-marginal gauche par des adultes dyslexiques et des lecteurs typiques selon la condition (non-parole versus parole) : différences entre la situation active et le repos. D'après Dufor et al. 2007 (TEP) [9].

3.3 En résumé

Les résultats relevés en comportemental indiquent que les dyslexiques perçoivent moins bien que les lecteurs typiques les différences phonémiques (pour une synthèse, voir Noordenbos & Serniclaes 2015). Ils signalent également que le déficit de perception catégorielle est – au moins en partie – spécifique au traitement du langage : il ne s'expliquerait pas par une déficience des mécanismes auditifs en amont. De plus, ces résultats montrent que les performances des dyslexiques sont, sous certains aspects, meilleures que celles des lecteurs typiques (cf. la perception allophonique), ce qui va à l'encontre de l'hypothèse selon laquelle leurs performances dans ces tâches s'expliqueraient par un déficit attentionnel (Hazan, Messaoud-Galusi, Rosen, Nouwens & Shalespeare 2009, Messaoud-Galusi, Hazan & Rosen 2011). Les résultats relevés en neuroimagerie signalent eux aussi un déficit spécifique à la parole. Ce déficit se manifeste par une hypo-activation d'une zone spécifique du cerveau (le gyrus supra-marginal) observée lors de l'écoute d'analogues de sons de la parole quand ces sons sont présentés comme étant des syllabes, et non lorsqu'ils sont présentés comme étant des sifflements. Ces résultats apportent des arguments supplémentaires à l'appui de l'explication de la dyslexie par un déficit phonologique.

4. Synthèse

Le déficit de perception catégorielle relevé dans des études comportementales et de neuroimagerie chez les dyslexiques peut expliquer les

9. Pour une présentation rapide de cette technique, voir la note 5.

difficultés qu'ils rencontrent quand ils doivent utiliser le décodage, c'est-à-dire une procédure de lecture s'appuyant sur les correspondances graphème-phonème (CGP). En effet, cette procédure ne peut pas fonctionner correctement quand les catégories phonémiques d'un sujet sont peu spécifiées et quand, de surcroit, il perçoit des allophones, ce qui semble être le cas des dyslexiques. Le premier déficit entraine un affaiblissement des connexions entre les graphèmes et les phonèmes alors que le second a pour conséquence un élargissement du nombre de connexions entre ces unités. La mise en place et l'automatisation de ces connexions dépend aussi de la transparence des correspondances graphème-phonème dans la langue, l'opacité de ces correspondances, comme la perception allophonique, entrainant un élargissement des connexions à mettre en place. Les résultats présentés dans cette contribution, ainsi que d'autres obtenus tant en comportemental qu'en neuroimagerie (pour une synthèse voir Serniclaes & Sprenger-Charolles 2015), apportent donc des éléments de réponse à une question posée par Weigl et Bierwisch en 1976, celle de l'autonomie des structures graphémiques par rapport aux structures phonémiques.

Conclusion

Trois autres points sont à souligner quant à l'apport de la neuroimagerie dans les domaines examinés dans cette contribution. D'une part, certains des résultats présentés (Dehaene-Lambertz *et al.* 2005) ont mis en relief un remarquable partage du travail dans le cerveau gauche. En effet, chez des sujets non pathologiques, le gyrus supramarginal est spécifiquement activé en condition parole pour le traitement des différences phonologiques (/ba/ *versus* /da/), le thalamus et l'insula réagissant aux différences acoustiques entre les stimuli, quelles qu'elles soient (deux /ba/ différents ou /ba/ *versus* /da/), tandis que le sulcus temporal supérieur réagit spécifiquement aux différences entre condition parole et non-parole.

Ces résultats, ainsi que d'autres, ont également permis de noter que des réponses neuronales spécifiques sont associées à des tâches spécifiques chez des sujets non pathologiques. En plus de l'exemple de la perception catégorielle noté ci-dessus, c'est le cas pour la zone dite de la forme visuelle des mots (VWFA) qui est activée pendant la lecture de mots, y compris dans des conditions dans lesquelles cette lecture n'est pas directement sollicitée comme dans l'étude de Parviainen *et al*. (2006). Par contre, chez les dyslexiques, la zone de la forme visuelle des mots (tout comme le gyrus supra-marginal) est hypo-activée (Paulesu *et al*. 2001, Dufor *et al*. 2007). En l'état de la recherche il est toutefois difficile de savoir si ces hypo-activations

sont une cause – ou une conséquence – des difficultés de lecture des dyslexiques.

Un dernier point important pour les politiques éducatives : la plupart des changements induits par l'apprentissage de la lecture observés au niveau cérébral concernent l'utilisation des correspondances graphème - phonème. Ce constat est en accord avec les nombreux résultats relevés en comportemental indiquant que les méthodes d'enseignement les plus efficaces sont celles basées sur les CGP (pour une synthèse en français, voir Sprenger-Charolles & Colé 2013b).

Références

BOGLIOTTI Caroline, SERNICLAES Willy, MESSAOUD-GALUSI Souhila and SPRENGER-CHAROLLES Liliane, 2008, "Discrimination of Speech Sounds by Children with Dyslexia: Comparisons with Chronological Age and Reading Level Controls", *Journal of Experimental Child Psychology*, n° 101 (2), p. 137-155.

BREM Silvia, BACH Silvia, KUCIAN Karin *et al*. 2010, "Brain Sensitivity to Print Emerges when Children Learn Letter-speech Sound Correspondences", *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, n° 107, p. 939-944.

COHEN Laurent and DEHAENE Stanislas, 2004, "Specialization in the Ventral Stream: The Case for the Visualword form Area", *Neuroimage,* n° 22*,* p. 466-476.

DEHAENE Stanislas, 2014, "Reading in the Brain Revised and Extended: Response to Comments", *Mind and Language*, n° 29 (3), p. 320-335.

DEHAENE Stanislas, Dehaene-LAMBERTZ Ghislaine, GENTAZ Edouard, HURON Caroline et SPRENGER-CHAROLLES Liliane, 2011, *Apprendre à lire : des sciences cognitives à la salle de classe*, Paris, Odile Jacob.

DEHAENE Stanislas, NAKAMURA Kimihiro, JOBERT Antoinette, KUROKI Chihiro, OGAWA Seiji and COHEN Laurent, 2010, "Why do Children Make Mirror Errors in Reading? Neural Correlates of Mirror Invariance in the Visual Word form Area", *Neuroimage*, n° 49 (2), p. 1837-1848.

DEHAENE-LAMBERTZ Ghislaine, PALLIER Christophe, SERNICLAES Willy, SPRENGER-CHAROLLES Liliane, JOBERT Antoinette and DEHAENE Stanislas, 2005, "Neural Correlates of Switching from Auditory to Speech Perception", *Neuroimage*, n° 24 (1), p. 21-33.

DUFOR Olivier, SERNICLAES Willy, SPRENGER-CHAROLLES Liliane and DÉMONET Jean-François, 2007, "Top-down Processes During Auditory Phoneme Categorization in Dyslexia: A PET Study", *Neuroimage*, n° 34 (4), p. 241-248.

DUFOR Olivier, SERNICLAES Willy, SPRENGER-CHAROLLES Liliane and DÉMONET Jean-François, 2009, "Left Premotor Cortex and Allophonic Speech Perception in Dyslexia: A PET Study", *Neuroimage*, n° 46 (1), p. 241-248.

GENTAZ Edouard, SPRENGER-CHAROLLES Liliane and THEUREL Anne, 2015, "Differences in the Predictors of Reading Comprehension in First Graders from Low Socio-economic Status Families with Either Good or Poor Decoding Skills", *Plos One*, n° 2 (3), e0119581.

HAZAN Valerie, MESSAOUD-GALUSI Souhila, ROSEN Stuart, NOUWENS Susan and SHALESPEARE Bethanny, 2009, "Speech Perception Abilities of Adults with Dyslexia: Is there any Evidence for a True Deficit?", *Journal of Speech Language and Hearing Research*, n° 52 (6), p. 1510-1529.

KOLINSKY Régine, MORAIS Jose, COHEN Laurent, DEHAENE-LAMBERTZ Ghislaine et DEHAENE Stanislas, 2014, « L'influence de l'apprentissage du langage écrit sur les aires du langage », *Revue de neuropsychologie*, n° 6 (3), p. 173-181.

LIBERMAN Alvin, COOPER Franklin, SHANKWEILER Donald and STUDDERT-KENNEDY Michael, 1967, "Perception of Speech Code", *Psychological Review*, n° 74, p. 431-461.

LYON Reid, SHAYWITZ Bennett and SHAYWITZ Sally, 2003, "A Definition of Dyslexia", *Annals of Dyslexia*, n° 53, p. 1-14.

MESSAOUD-GALUSI Souhila, HAZAN Valerie and ROSEN Stuart, 2011, "Investigating Speech Perception Abilities in Children with Dyslexia: Is there Evidence of a Consistant Deficit in Individuals?", *Journal of Speech Language and Hearing Research*, n° 54 (6), p. 1682-1701.

MODY Maria, STUDDERT-KENNEDY Michael and BRADY Susan, 1997, "Speech Perception Deficits in Poor Readers: Auditory Processing or Phonological Coding?", *Journal of Experimental Child Psychology,* n° 64, p. 199-231.

NOORDENBOS Mark, SEGERS Eliane, SERNICLAES Willy and VERHOEVEN Ludo, 2013, "Neural Evidence of the Allophonic Mode of Speech Perception in Adults with Dyslexia", *Clinical Neurophysiology*, n° 124, p. 1151-1162.

NOORDENBOS Mark and SERNICLAES Willy, 2015, "The Categorical Perception Deficit in Dyslexia: A Meta-Analysis", *Scientific Studies of Reading*, n° 19 (5), p. 340-359.

PARVIAINEN Tiina, HELENIUS Päivi, POSKIPARTA Elisa, NIEMI Pekka and SALMELIN Riitta, 2006, "Cortical Sequence of Word Perception in Beginning Readers", *Journal of Neuroscience*, n° 26 (22), p. 6052-6061.

PAULESU Eraldo, DÉMONET Jean-François, FAZIO Federico *et al*., 2001, "Dyslexia: Cultural Diversity and Biological Unity", *Science*, n° 291 (5511), p. 2165-2167.

PEEREMAN Ronald, SPRENGER-CHAROLLES Liliane and MESSAOUD-GALUSI Souhila, 2013, "The Contribution of Morphology to the Consistency of Spelling-to-sound relations: A Quantitative Analysis Based on

French Elementary School Readers", *L'Année psychologique*, n° 113 (1), p. 3-33.

PIQUARD-KIPFFER Agnès and SPRENGER-CHAROLLES Liliane, 2013, "Early Predictors of Future Reading Skills: A Follow-up of French-speaking Children from the Beginning of Kindergarten to the End of the Second Grade (age 5 to 8)", *L'Année psychologique*, n° 113 (4), p. 491-521.

ROSEN Stuart and MANGANARI Eva, 2001, "Is there a Relationship between Speech and Nonspeech Auditory Processing in Children with Dyslexia?", *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, n° 44, p. 720-736.

SERNICLAES Willy and SPRENGER-CHAROLLES Liliane, 2015, "Reading Impairment: From Behavior to Brain", in R. Bahr and E. Silliman (eds.), *Handbook of Communication Disorders*, London, Routledge, p. 34-45.

SERNICLAES Willy, SPRENGER-CHAROLLES Liliane, CARRÉ René and DÉMONET Jean-François, 2001, "Perceptual Categorization of Speech Sounds in Dyslexics", *Journal of Speech Language and Hearing Research*, n° 44, p. 384-399.

SHANKWEILER Donald and LIBERMAN Isabelle, 1989, *Phonology and Reading Disability: Solving the Reading Puzzle,* Ann Arbor, University of Michigan Press.

SPRENGER-CHAROLLES Liliane et COLÉ Pascale, 2013a, *Lecture et dyslexie : Approches cognitives*, Paris, Dunod (2e éd).

SPRENGER-CHAROLLES Liliane et COLÉ Pascale, 2013b, « Quelles sont les méthodes les plus efficaces pour apprendre à lire ? Études avec des enfants ayant appris à lire en langue maternelle ou seconde », *Approche neuropsychologique des apprentissages chez l'enfant*, n° 123, p. 127-134.

SPRENGER-CHAROLLES Liliane, SIEGEL Linda, JIMENEZ Juan and ZIEGLER Johannes, 2011, "Prevalence and Reliability of Phonological, Surface, and Mixed Profiles in Dyslexia: A Review of Studies Conducted in Languages Varying in Orthographic Depth", *Scientific Studies of Reading*, n° 15, p. 498-521.

STARR Matthew and RAYNER Keith, 2001, "Eye Movements During Reading: Some Current Controversies", *Trends in Cognitive Sciences*, n° 5, p. 156-163.

WEIGL Egon et BIERWISCH Manfred, 1976, « Neuropsychologie et neurolinguistique », *Langage*, n° 44, p. 4-17.

YONCHEVA Yuliya, ZEVIN Jason, MAURER Urs and MCCANDLISS Bruce, 2010, "Auditory Selective Attention to Speech Modulates Activity in the Visual Word form Area", *Cerebral Cortex*, n° 20, p. 622-632.