

## Séance dédiée : « Les troubles spécifiques des apprentissages chez l'enfant »

### CONFÉRENCE INVITÉE

## Dyslexie et troubles apparentés : une nouvelle thématique de santé publique, entre neuroscience et pédagogie

MOTS-CLÉS : DYSLEXIE. APPRENTISSAGE. CERVEAU. IRM

KEY-WORDS: DYSLEXIA. LEARNING. BRAIN. MRI

Michel HABIB\*

**L'auteur déclare ne pas avoir de liens d'intérêt en relation avec le contenu de cet article.**

### RÉSUMÉ

*Les troubles spécifiques d'apprentissage, et au premier chef la dyslexie de développement qui en est la forme la plus fréquente et la mieux étudiée, concernent environ 6 à 8 % de la population d'enfants d'âge scolaire, et 4 % des adultes. Chez l'enfant, ils constituent en France le motif principal de demande de compensation du handicap. Cet article se donne pour but de présenter les principales avancées réalisées durant les dernières années dans le domaine. En premier lieu, la publication récente du DSM-5 a significativement modifié la nosographie des troubles en suggérant d'utiliser un terme générique, « troubles spécifiques d'apprentissage », pour se référer à tous les troubles de la lecture, du calcul ou de l'écriture, entérinant ainsi l'évidence clinique de leur fréquente association et suggérant des mécanismes communs. De même, la recherche neuroscientifique, longtemps restreinte à la seule étude des troubles de la lecture, considérés comme reflétant une installation déficiente, d'origine en grande partie génétique, des processus phonologiques sous-jacents, s'oriente actuellement vers des mécanismes plus généraux, comme un défaut de connectivité et d'intégration multimodalitaire, expliquant mieux la variabilité des symptômes et de leurs associations, mais aussi l'effet de facteurs d'ordre culturel et environnemental à côté des*

\* Résodys, Aix-Marseille Université, et Centre de Référence des Troubles d'apprentissage, CHU Timone, Marseille.

*Tirés-à-part* : Professeur Michel HABIB, Résodys, 3 square Stalingrad, 13001 Marseille.

*Article reçu le 22 janvier 2015, accepté le 16 février 2015.*

*facteurs génétiques. Ces nouvelles données, cependant, restent très incomplètes et un approfondissement de la recherche prenant appui sur les méthodes de neuroimagerie devrait permettre, dans les années à venir, de proposer des protocoles standardisés et scientifiquement validés tant en matière de dépistage, de prévention que rééducation et de compensation.*

## SUMMARY

*Specific learning disabilities, and above all developmental dyslexia, the most common and best studied form, concerns approximately 6-8% of the population of children of school-age, and 4% of adults. The goal of this article is to present the main developments made in recent years in the field. First, the recent publication of the DSM-5 has significantly changed the nosography of these disorders, suggesting to use the generic term “ specific learning disabilities ” to refer to all reading, calculating or writing disorders, thus confirming the clinical evidence of their frequent association and suggesting common mechanisms. Similarly, neuroscientific research, for a long time limited to the sole study of reading disorders, considered to reflect poor installation, largely genetic in origin, of underlying phonological processes, is currently moving towards more general mechanisms such as a lack of connectivity and multimodality integration, better explaining not only the variability of symptoms and their associations, but also the effect of cultural and environmental factors in addition to genetic factors. These new data, however, remain very incomplete and further research building on neuroimaging methods should, in the future, provide standardized and scientifically validated protocols both in terms of screening, prevention and rehabilitation as well of compensation.*

Cela fait exactement quinze ans que furent publiés en France les premiers textes de recommandations officielles concernant la prise en charge, à la fois du point de vue médical et scolaire, des troubles d'apprentissage <sup>1</sup>, faisant rattraper rapidement à notre pays le retard qu'il avait pris en la matière par rapport à la majorité des autres pays industrialisés en particulier grâce à la création dans les CHU français de Centres de Référence spécialisés <sup>2</sup>. Ce faisant, la thématique est brusquement passée du statut d'artéfact psycho-pédagogique, où elle se trouvait jusqu'alors, à celui de véritable problème de santé publique, avec du même coup une prise de conscience massive de l'impact potentiel de ce problème sur l'individu et sur la société, et de la nécessité pour la médecine de s'imprégner de nouvelles connaissances scientifiques, à l'interface entre rééducation, prévention et pédagogie.

<sup>1</sup> Jean-Charles Ringard (2000). Rapport au Ministère de l'Éducation Nationale  
<http://www.education.gouv.fr/cid1944/a-propos-de-l-enfant-dysphasique-et-de-l-enfant-dyslexique.html>

<sup>2</sup> Rapport 2<sup>e</sup> journée des Assises Nationales des Centres de Référence TSLA. 14 juin 2013. CREAI Rhône-Alpes. <http://creai-ra.com>

### **Une définition consensuelle, mais imparfaite**

En France, on utilise de plus en plus souvent le terme de « *troubles dys* » pour se référer à ces difficultés que rencontrent certains enfants dans leurs acquisitions scolaires alors même que leur intelligence est strictement normale, voire supérieure, et qu'aucune autre cause neurologique, psychologique ou environnementale ne peut être décelée [1]. Une des représentations les plus répandues est celle schématisée sur la figure 1, volontiers appelée « constellation des dys », pour signifier le point commun à toutes les entités qui y sont représentées : la présence d'un trouble d'apprentissage en dépit d'une intelligence intacte. Mais ces entités partagent également un autre trait commun, la fréquence de leurs associations chez un même individu. Cette notion de comorbidité, nous le verrons, est cruciale, non seulement du point de vue diagnostique, mais également pour en approcher les mécanismes.

Parmi ces troubles, le plus connu, et sans conteste possible celui qui a fait l'objet du plus grand nombre de travaux scientifiques, est la *dyslexie de développement*, trouble spécifique de l'acquisition de la lecture. C'est en effet très généralement lors de l'apprentissage de la lecture que ces troubles sont repérés : alors que rien ne le laissait antérieurement présager, l'enfant lors de la première année de l'école primaire ne peut entrer dans la procédure requise pour apprendre à lire, à savoir la mise en relation des éléments visuels (graphèmes) et sonores (phonèmes) du langage écrit. Cette difficulté dans la conversion grapho-phonémique a été, depuis le milieu des années 80, attribuée de façon consensuelle à un déficit fondamental chez ces enfants de la mise en place, avant même l'âge de la lecture, d'une fonction cognitive particulière, la conscience phonologique, c'est-à-dire la capacité de concevoir le langage oral comme constitué de mots, de syllabes et de phonèmes et à manipuler volontairement ces constituants [2, 3]. Cette vision du problème a eu un impact considérable sur les pratiques, mais aussi sur les concepts, de sorte que la grande majorité des travaux en neurosciences se sont en fait concentrés sur le trouble de la lecture, et notamment sur le trouble phonologique considéré comme à son origine.

### **Une réalité clinique bien plus complexe**

Or une telle conception est certainement réductrice, eu égard à la complexité séméiologique du trouble et à la grande variété de ses présentations cliniques [4-6]. En pratique, en effet, le cas de figure du trouble de la lecture isolé dans un contexte de difficultés linguistiques plus ou moins avérées, et chez qui les difficultés de lecture vont pouvoir être mises en relation avec un trouble phonologique, n'est pas le plus fréquent, et ce pour au moins deux raisons : en premier lieu, plus souvent que l'inverse, le trouble de la lecture n'est pas isolé ; il se trouve en général associé à d'autres troubles qui sont parfois au second plan, mais en général bien visibles si on sait et que l'on pense à les rechercher : trouble du langage, mais aussi trouble de

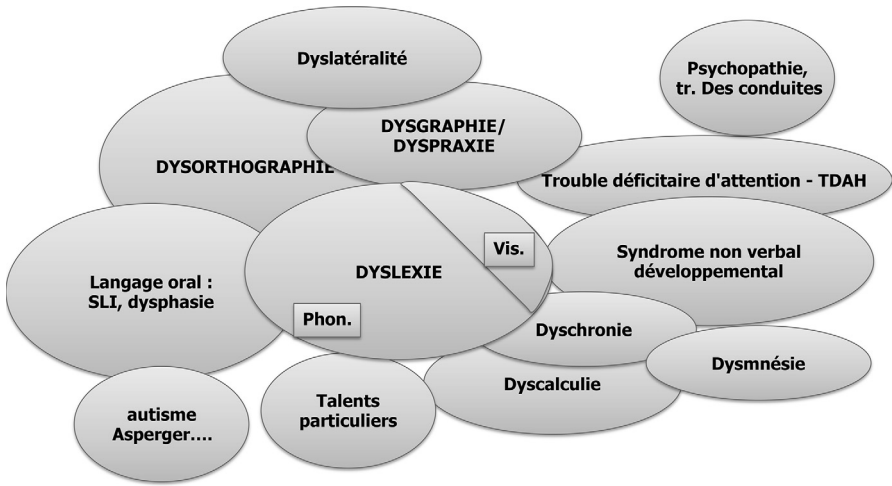


FIG. 1. — La « constellation dys » : troubles spécifiques des apprentissages. Autour de la dyslexie, trouble spécifique de la lecture, un ensemble d'entités nosologiques ayant en commun : leur impact sur les apprentissages, la normalité du Q.I. et leurs fréquentes co-occurrences (in :[4]).

l'écriture, troubles du calcul, troubles de la motricité oculaire, trouble de l'attention, trouble de la mémoire. En second lieu, il est de plus en plus souvent souligné l'existence de cas de dyslexie, même sévère, qui n'ont aucun trouble phonologique ni linguistique d'aucune sorte, impliquant de facto que, pour ces cas au moins, le mécanisme du trouble est autre que phonologique. Ainsi, la pratique quotidienne de ces enfants dément l'assertion généralement admise selon laquelle seule la lecture est touchée et celle selon laquelle la cause univoque ne peut en être que phonologique. Or ces deux assertions constituaient la thèse dominante, tant pour les cliniciens que les chercheurs, durant toutes ces années, du moins jusqu'à la récente parution du DSM-5 [7], qui a apporté une véritable révolution dans le domaine de la nosographie. En premier lieu, alors que son prédécesseur, le DSM-IV [8], classification internationale en vigueur depuis les années 80, consacrait une rubrique aux troubles d'apprentissage, et au sein de cette rubrique accordait une place entière à chacun des trois principaux troubles : la dyslexie, la dyscalculie et le trouble d'écriture, avec chacun leur série de critères permettant d'aboutir au diagnostic, le DSM-5 crée un nouveau cadre, celui des troubles *spécifiques* d'apprentissage, proposant des critères diagnostiques regroupant l'ensemble des signes relevant de troubles de la lecture, du calcul ou de l'écriture (tableau I). En outre, selon la même logique de regroupement nosographique, le DSM-5 propose un nouveau cadre général, celui des « troubles du neuro-développement » ('neurodevelopmental disorders'), comportant, à côté des troubles spécifiques sus-cités, les troubles du langage, les troubles des acquisitions motrices, les troubles de l'attention avec ou sans hyperactivité, et aussi les troubles du spectre autistique et les déficits intellectuels généraux. Ainsi, au-delà de son aptitude à refléter plus fidèlement la complexité clinique du problème, le DSM-5

TABLEAU I — Critères diagnostiques des troubles spécifiques d'apprentissage, d'après le DSM-5 (traduction libre du texte américain, APA, 2013).

<b>Critères des Troubles Spécifiques d'Apprentissage</b>
A. Difficulté à apprendre et à utiliser les aptitudes académiques, comme indiqué par la présence depuis au moins 6 mois d'au moins un des symptômes suivants :
1 - lecture de mots inexacte, lente ou laborieuse
2 - difficulté à comprendre la signification de ce qui est lu (même si lu correctement)
3 - difficultés d'orthographe (spelling)
4 - difficultés dans l'expression écrite (p.e. erreurs de ponctuation ou grammaticales, manque de clarté de l'expression des idées)
5 - difficulté à maîtriser le sens des nombres, les faits numériques, ou le calcul
6 - difficulté dans le raisonnement mathématique
B. Significativement en-dessous de ceux attendus pour l'âge et interfère significativement avec les performances académiques ou les occupations
C. Commence durant les années d'école mais peut n'être manifeste que dès lors que les demandes excèdent les capacités limitées de l'individu
D. Pas mieux expliquées par déficience intellectuelle, acuité auditive ou visuelle non corrigée, autres troubles neurologiques ou mentaux, adversité psycho-sociale...

fournit implicitement des pistes aux chercheurs, les incitant à raisonner en terme de « trouble spécifique des apprentissages » voire en termes de 'troubles du neuro-développement' [9].

### Considérations démographiques

La prévalence de la dyslexie et des troubles dys varie de façon importante selon les études, de 5 % à 15 %, de sorte qu'on avance en général des chiffres moyens tenant compte de cette variabilité, soit de 6 à 8 % des enfants d'âge scolaire. La dyslexie elle-même représente sans doute la part la plus importante, la fréquence des co-morbidités impliquant un fort recouvrement avec les autres troubles dys. Ce taux est du reste celui retrouvé dans les quelques études françaises, dont il faut noter qu'elles sont rares, et de moindre envergure que les études anglo-saxonnes [1]. Parmi les facteurs de variations possibles, deux ont été particulièrement étudiés : le milieu socio-économique, et la langue maternelle. Les études réalisées sur des jumeaux estiment de .50 à .60 la part de l'hérédité dans les troubles de l'apprentissage de la lecture, laissant ainsi une large place aux facteurs environnementaux. D'autres recherches ont montré que la qualité de l'environnement familial et les expériences

de lecture précoce contribuent à l'émergence de compétences préalables à la lecture et que les compétences phonologiques sont plus faibles chez les enfants issus de milieux défavorisés. Fluss et collaborateurs [10], après une vaste étude de plus de 1 000 enfants répartis dans 20 écoles de la ville de Paris, concluent que l'incidence de la dyslexie varie de 3,3 % à 24,2 % selon le milieu socio-économique. L'influence de la langue maternelle, pour sa part, a été affirmée grâce à diverses études qui ont convergé vers l'idée que l'apprentissage de la lecture était fondamentalement différent dans les langues dites transparentes, où la correspondance entre les graphèmes et les phonèmes est simple et univoque (comme l'Italien, par exemple) et les langues dite opaques, où la forme orale est peu ou pas prédictible à partir de la forme écrite de la langue (comme l'Anglais ou à un moindre degré le Français). C'est la raison pour laquelle on admet que la dyslexie est plus fréquente (sans doute en fait plus facilement reconnue) chez les derniers que chez les premiers. Des études en imagerie cérébrale ont confirmé que ces différences correspondent bien à des différences cérébrales tant du point de vue fonctionnel que structurel (voir ci-dessous).

### **La théorie phonologique de la dyslexie**

Lorsque l'enfant apprend à parler, un certain nombre de phénomènes surviennent de façon totalement automatique et inconsciente chez lui. Par exemple l'intuition grammaticale que confèrent les régularités syntaxiques de la langue, ce que l'on appelle volontiers la conscience syntaxique, ou encore la conscience progressive que le mot est auditivement constitué de segments sub-lexicaux : la syllabe, l'attaque, la rime et finalement le phonème, plus petite unité perceptible du langage, la conscience phonologique. Cette conscience phonologique est à la fois considérée comme un précurseur indispensable de l'acquisition de la lecture et un marqueur privilégié des troubles d'acquisition de la lecture que sont les dyslexies. Ultérieurement, les travaux en imagerie fonctionnelle ont montré que ce déficit phonologique chez le dyslexique était lié à un défaut d'activation d'un ensemble de régions hémisphériques gauches superposables à l'aire corticale du langage, avec, fait particulièrement frappant, quelques différences significatives selon les caractéristiques écrites de la langue maternelle [11 ; 12]. C'est ainsi que le défaut d'activation caractéristique des dyslexies dans les langues occidentales, est sensiblement différent dans sa localisation par rapport à celle des dyslexiques chinois, chez qui la zone sous-activée est plus proche des centres de l'écriture que de ceux de la vision. En tout cas, en Français, en Anglais, comme en Chinois, l'hypothèse phonologique est jusqu'ici, l'hypothèse de loin la plus répandue.

Entre 2000 et 2004, un nombre considérable de travaux en imagerie cérébrale fonctionnelle ont établi les bases de ce qu'on peut aujourd'hui appeler une 'neuroanatomie de la dyslexie'. Ces faits ont été consignés en une méta-analyse souvent citée de nos collègues du CHU de Toulouse [13] auxquels est emprunté le schéma de la figure 2.

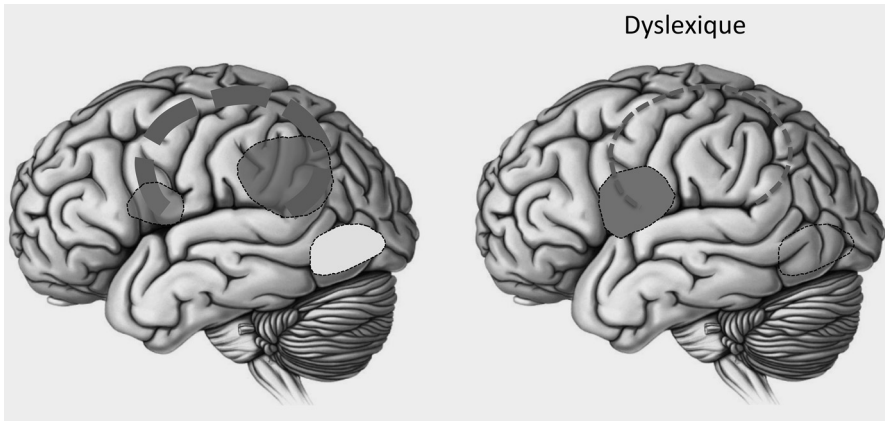


FIG. 2. — Activations corticales de l'hémisphère gauche lors de la lecture de mots chez un sujet dyslexique (à droite) ; chez un sujet témoin (à gauche). En jaune : Aire de la forme visuelle des mots (VWFA) ; en vert : cortex frontal latéral inférieur (aire de Broca) ; en rouge : carrefour temporo-pariétal (aire de Geschwind). Le trait pointillé montre le trajet sous-cortical du faisceau arqué et son développement plus faible chez le dyslexique. D'après [13] et [16].

Sur ce schéma on observe que ce sont trois régions qui différencient le fonctionnement du cerveau d'un dyslexique par rapport aux normo-lecteurs ; les trois régions sont des aires corticales de l'hémisphère gauche, deux d'entre elles sont connues pour leur implication dans le langage : l'aire de Broca, ou cortex pré-frontal inférieur et le carrefour temporo-pariétal (aire de Geschwind). La troisième est une région dont le rôle spécifique dans la lecture a été l'une des grandes révélations de la recherche de cette dernière décennie : l'aire de la forme visuelle des mots ou *visual word form area* (VWFA), située dans le gyrus fusiforme gauche, soit sur le bord inférieur de l'hémisphère gauche, à mi-distance entre le pôle temporal et le pôle occipital, à proximité donc du cortex visuel. Cette zone est considérée comme la zone responsable de l'attribution d'un statut linguistique aux stimuli visuels que représentent les suites de lettres lors de la lecture. Elle se spécialise lors des tout premiers moments de l'apprentissage de la lecture [14] et semble la partie du cerveau la plus significativement sous-activée chez les enfants et adultes dyslexiques (en tout cas dans les langues dites alphabétiques). Depuis lors, plusieurs méta-analyses [15 ; 16] sont venues confirmer que ces trois zones sont activées lors de la lecture et/ou lors de tâches phonologiques orales ou visuelles (dire si deux mots lus riment ou non) et qu'elles dysfonctionnent chez le dyslexique. Toutefois, dire que ces zones dysfonctionnent n'a pas nécessairement valeur de mécanisme causal, puisque cela pourrait être seulement dû à une sous-utilisation de ces régions, qui serait la conséquence plutôt que la cause du problème.

### **Cause ou conséquence ?**

Dans cette quête de la compréhension des mécanismes sous-jacents, certains travaux ont précisément tâché d'écartier ce biais en comparant des sujets d'âges différents, montrant en particulier que les anomalies constatées étaient toujours visibles lorsqu'on compare les dyslexiques à des témoins de même âge de lecture (et non plus seulement de même âge chronologique). De cette manière, on a pu affirmer que les anomalies d'activation cérébrale du dyslexique ne sont pas la conséquence d'un défaut d'exercice de la lecture [17]. Mais les travaux les plus instructifs à cet égard sont certainement ceux qui vont chercher l'anomalie éventuelle avant même l'âge d'apprentissage de la lecture. Dès lors, si une anomalie significative est décelée, elle a toute chance de se voir attribuer un rôle causal. C'est ce qui a pu être démontré dans une série de travaux basés sur l'idée d'un déficit de perception auditive très précoce à l'origine des troubles phonologiques responsables de la dyslexie. Par exemple, une célèbre étude s'étendant sur plus de 15 ans, l'étude longitudinale de l'université Jyväskylä en Finlande [18], a pu montrer chez des enfants de 6 mois provenant de familles dites à risque (pour comporter des cas de troubles du langage oral et écrit) des anomalies des modifications électrophysiologiques (potentiels évoqués auditifs) évoquées par des changements de phonèmes, par rapport à des enfants de familles non à risque. Qui plus est, ces mêmes enfants, dès 2 ans, présentent un retard sur la combinaison des mots et, à 3 ans et demi, une différence apparaît dans des tâches phonologiques et lexicales. Plus récemment, des auteurs ont tenté de mettre en évidence le risque de dyslexie sur des clichés d'IRM [19 ; 20], montrant que des enfants ayant un dyslexique avéré dans leur famille ont, avant tout apprentissage de la lecture, à la fois une plus faible densité de substance grise dans les régions temporales et une plus faible activation de ces régions dans des tâches phonologiques.

### **Anomalies morphologiques sur le cerveau de dyslexiques**

Bien qu'elle se heurte aux mêmes problèmes de causalité que celle utilisant l'imagerie fonctionnelle, la recherche utilisant l'imagerie morphologique est a priori, encore plus que cette dernière, réputée susceptible d'apporter des informations d'ordre étiologique. Rappelons ici les toutes premières preuves d'anomalies de la morphologie cérébrale chez le dyslexique [21] qui avaient décelé, à l'examen microscopique du cortex de 5 individus dyslexiques, des ectopies corticales, sortes d'excroissances du cortex, sans traduction macroscopique, mais suggérant fortement une anomalie très précoce dans le développement cérébral, probablement au stade de la migration neuronale, soit autour de la 35<sup>e</sup> semaine de gestation chez l'humain. Bien qu'elles n'aient plus été répliquées depuis lors, ces constatations eurent, en leur temps, le mérite de fournir un puissant moteur aux recherches ultérieures sur l'anatomie du cerveau des dyslexiques. Ce n'est cependant qu'avec le raffinement des méthodes



d'IRM, en particulier l'étude voxel à voxel (VBM) et l'IRM de diffusion (DTI) que la morphologie cérébrale du dyslexique a pu être approchée de manière suffisamment précise pour apporter des résultats fiables. La première de ces méthodes a permis de démontrer que les zones hypoactives chez les dyslexiques en imagerie fonctionnelle, sont également le siège d'anomalies de densité corticale, généralement dans le sens d'un amincissement du cortex [22]. Mais c'est surtout la seconde de ces méthodes, également appelée tractographie, qui a apporté les informations les plus pertinentes et surtout les plus concordantes entre les différentes études. Grâce à la possibilité qu'elle offre de reconstruire avec une grande précision la structure des faisceaux de substance blanche, la DTI a permis de réaliser que c'est au niveau sous-cortical, et non cortical, que se situent les anomalies les plus significatives et les plus constantes du point de vue de la morphologie cérébrale du dyslexique, plus précisément au niveau des fibres sous-jacentes au cortex temporo-pariétal gauche, incluant en particulier un faisceau déjà bien connu pour son rôle dans le langage, le *faisceau arqué*. Ce faisceau, qui unit les régions de Wernicke et de Broca, recevant sur son trajet des fibres provenant de la région de Geschwind (figure 2), a fait l'objet depuis l'introduction de cette méthode de nombreuses études ayant confirmé son rôle majeur à la fois dans le développement du langage [23], dans la récupération de certaines aphasies [24], mais aussi le fait que cette structure est largement dépendante de l'expérience répétée de certaines activités sensori-motrices, comme la pratique du chant ou d'un instrument de musique [25]. Pour revenir à la dyslexie, il existe à présent une dizaine d'études séparées qui convergent pour montrer que le faisceau arqué est la structure cérébrale la plus significativement différente entre un cerveau de dyslexique et des témoins non dyslexiques, différence portant sur l'organisation spatiale des fibres à l'intérieur du faisceau (anisotropie) mais aussi sur le volume même de ce faisceau [26]. En outre, il a été démontré que l'intensité de ces anomalies est proportionnelle au degré d'altération individuelle sur des tâches cognitives impliquant la lecture et la phonologie, suggérant ainsi fortement un lien entre ces particularités anatomiques et le mécanisme sous-jacent au trouble de la lecture [27].

Pour le moment, cependant, il n'est pas encore possible de dire si ces anomalies de morphologie cérébrale sont ou non causalement liées au trouble dyslexique. Certains travaux sembleraient le suggérer, comme la démonstration d'une altération de ces fibres de substance blanche chez des enfants pré-lecteurs issus de familles à risque de dyslexie et le fait que cette altération est proportionnelle à la présence de difficultés dans des tâches pré-lectrices de phonologie [28], ou encore la démonstration d'un lien entre ces anomalies de la substance blanche et la présence de gènes de susceptibilité impliqués dans les études de liaison génétique dans des familles de dyslexiques [29].

### **Alternatives aux théories purement phonologiques**

Comme nous l'avons laissé entendre, l'un des problèmes majeurs qui émerge de toute la littérature sur les mécanismes de la dyslexie, est le fait qu'elle se soit

essentiellement concentrée sur l'existence, certes cruciale, mais non universelle, du trouble phonologique, sans tenir compte d'un point pourtant fondamental en clinique : la variété des domaines cognitifs qui lui sont le plus souvent associés. C'est ainsi qu'ont été explorées plusieurs pistes alternatives, dont une des plus connues est celle du *trouble du traitement temporel* [30] qui a obtenu un vif succès au milieu des années 90 par la démonstration que le ralentissement artificiel de la parole entendue pouvait avoir un effet curatif sur le trouble du langage oral et écrit de ces enfants [31]. En fait, divers aspects de ce qu'on appelle la cognition temporelle sont déficitaires chez le dyslexique : déficit de la perception de la durée [32], difficulté dans la production de l'ordre des phonèmes ou des lettres [33], à produire un mouvement qui soit synchrone à un battement arbitrairement donné par un métronome [34]. Plus récemment, une étude similaire [35] a en outre montré que le déficit dans cette tâche de tempo était proportionnel aux difficultés de lecture et qu'il prédisait mieux que la plupart des autres variables analysées le niveau de lecture et d'orthographe. Ces observations, parmi d'autres, ont été à l'origine de l'idée que le cervelet pouvait être spécialement impliqué dans la dyslexie. Nicolson et ses collaborateurs [36] ont ainsi proposé une *théorie cérébelleuse de la dyslexie*, selon laquelle le primum movens serait un trouble durant la première enfance de la mise en place des engrammes moteurs correspondant aux phonèmes, trouble qui, associé à des difficultés dans l'automatisation des procédures d'apprentissages, elle-même attribuée à un dysfonctionnement du cervelet, rendrait compte d'un maximum d'observations réalisées cliniquement chez le dyslexique, en particulier l'association de troubles de la motricité et de l'écriture, qui ne peut pas être expliquée par une théorie purement phonologique. Citons enfin un ensemble de travaux, que nous ne détaillerons pas ici, tendant à démontrer l'existence d'un trouble des processus attentionnels au sens large, en tant que processus transversal [37], potentiellement impliqué dans tous les apprentissages initiaux, ou plus spécifiquement dans l'apprentissage de la lecture, à travers la notion de processus visuo-attentionnels ou de traitement attentif de la forme visuelle des lettres et des mots [38 ; 39]. Il a même été démontré que la performance à des tâches d'attention visuo-spatiale réalisées chez des pré-lecteurs prédisaient leur performance en lecture trois ans après [40]. Bien plus souvent, cependant, le déficit attentionnel est une association comorbide de la dyslexie plutôt qu'une cause, tant il est vrai que nombre d'enfants souffrant de troubles attentionnels sévères apprennent pour autant à lire, écrire et compter sans grande difficulté. De la même manière, des troubles de l'oculo-motricité sont assez fréquemment rencontrés chez les dyslexiques et leur rééducation peut améliorer significativement la lecture, sans pour autant qu'ils soient considérés comme la cause de la dyslexie, plutôt un facteur aggravant ou déclenchant.

Plus récemment, plusieurs équipes distinctes ont développé l'idée que le trouble pourrait se situer de manière plus générale au niveau de l'incapacité du cerveau du dyslexique à faire coïncider des stimuli de nature différente, comme par exemple l'image visuelle d'une lettre (graphème) et son correspondant sonore (phonème) [41. 42]. Plusieurs travaux récents [43 ; 44 ; 45] ont ainsi insisté sur le caractère

multisensoriel du déficit, mettant l'accent sur le fait que c'est l'intégration entre les stimuli auditifs (phonétiques) et visuels (graphémiques) qui serait la base du déficit chez les dyslexiques, par exemple en empêchant la distribution des ressources attentionnelles entre les deux modalités [46].

### **Au-delà de la dyslexie**

Ainsi la dyslexie peut se concevoir comme un défaut de mise en relation des engrammes sensori-moteurs de la parole avec la représentation auditive des phonèmes de la langue. Qu'en est-il des autres entités par exemple la dyscalculie ou la dysgraphie ? L'enfant dyscalculique, pour sa part, est dans l'impossibilité d'entrer dans l'apprentissage du calcul pour une raison actuellement bien acceptée : l'incapacité à se représenter mentalement les quantités signifiées par les nombres. En d'autres termes, un enfant, ou un adulte, dyscalculique est capable de connaître les mots afférents au langage numérique, les noms des chiffres, la syntaxe des nombres, la signification des opérations, mais ne peut transformer ces symboles en des concepts ayant une réalité numérique, c'est-à-dire représentant une quantité. Par exemple, un enfant dyscalculique aura toutes les peines du monde à savoir quel nombre il faut soustraire de l'autre dans une soustraction, tout simplement parce qu'il ne possède pas l'outil lui permettant de se représenter aisément, naturellement, automatiquement la quantité correspondant à chacun des deux nombres. Un enfant dysgraphique, pour sa part, n'est pas capable d'automatiser convenablement le geste distal de la main requis pour former des lettres, ce qui se fait de manière également assez rapide et instinctive chez la majorité des enfants, sans doute parce que la composante sonore et linguistique des lettres ne peut entrer en relation avec la représentation du geste nécessaire à leur transcription écrite. Dans ces deux cas, on peut donc concevoir le trouble comme une dysconnectivité entre un module linguistique et un autre module, celui de la représentation abstraite des quantités pour la dyscalculie, et celui de la représentation des gestes moteurs d'écriture pour la dysgraphie.

### **Tentative de synthèse et perspectives thérapeutiques**

Il existe donc à travers la littérature la plus récente, un large éventail de données suggérant d'orienter les remédiations et rééducations des enfants dyslexiques, non plus seulement sur la nature auditive ou visuelle du trouble mais sur son aspect inter-modalitaire, en favorisant autant que possible l'activation simultanée de canaux sensoriels différents. Par exemple, plusieurs équipes ont retrouvé une amélioration de la lecture chez des dyslexiques après 5 semaines d'un entraînement quotidien sur des jeux de type 'game-boy' où l'enfant devait associer systématiquement des sons non verbaux avec des traits représentant la hauteur, la durée et l'intensité de ces sons [47 ; 48].

Une application thérapeutique inédite de ces nouvelles conceptions propose d'utiliser l'apprentissage musical, et tout particulièrement l'apprentissage d'un instrument de musique, dans le but, en quelque sorte, de « remodeler » le cerveau dyslexique.

Au moins deux études récentes, ont montré que des musiciens dyslexiques sont plus performants que des dyslexiques non musiciens sur des tâches phonologiques et de lecture [49], et même que des témoins non dyslexiques sur certaines tâches rythmiques [50]. Comme nous l'avons écrit plus haut, des difficultés à traiter l'information temporelle en général, et en particulier à reproduire un tempo ou un rythme, ont été retrouvées de manière répétée chez les enfants dyslexiques [51], ce qui pourrait participer de difficultés d'acquisition de la conscience phonologique en altérant la perception du découpage syllabique de la parole.

Un argument supplémentaire est apporté par la mise en évidence chez des musiciens professionnels adultes, d'un effet mesurable de la pratique de la musique et du chant sur l'anatomie du faisceau arqué — effet qui est en outre d'une ampleur considérable (jusqu'à une fois et demi la taille de la structure chez des témoins non musiciens). Or, le faisceau arqué est précisément, nous l'avons vu, la partie du cerveau qui s'avère la plus altérée chez les sujets dyslexiques. Si on admet que cette particularité est le reflet (si ce n'est la cause) d'une connectivité déficiente entre des zones dont l'interaction est cruciale pour assurer les apprentissages primordiaux, on peut dès lors raisonnablement faire l'hypothèse qu'un entraînement intensif portant, en plus des aspects auditifs et rythmiques, sur l'intégration inter-modalitaire, c'est-à-dire associant de façon répétée et synchrone des stimulations auditives, visuelles et des actions motrices (comme jouer sur un clavier, effectuer des mouvements rythmiques du corps, ou de la danse), aurait toute chance d'améliorer des variables censées refléter la dysfonction chez le dyslexique. Tel est le raisonnement sur lequel nous nous sommes basés pour entreprendre, avec Mireille Besson, du CNRS de Marseille, un programme de recherche sur l'effet de l'apprentissage musical chez le dyslexique. Des résultats encourageants ont été d'ores et déjà obtenus, mais pour le moment préliminaires, ils doivent faire l'objet de confirmation avant de pouvoir affirmer l'utilité de la généralisation de cette voie thérapeutique.

## **En conclusion**

Quinze années de recherche en neurosciences n'ont certainement pas apporté toutes les clés qui permettraient d'élucider voire même d'appréhender la complexité de cet ensemble de troubles qui restent un terrain encore quasiment inexploré et globalement bien mystérieux. Les progrès de la génétique, que nous n'avons pas abordés dans cet article, n'ont pas non plus apporté pour le moment de solution à la question de la part respective de l'inné et de l'acquis dans la genèse des troubles. La simplification que semblait procurer une vision restreinte au domaine du trouble de la lecture n'était qu'apparente puisque elle laissait hors de portée de compréhension

des pans entiers de la problématique. Le fossé qui séparait jusqu'il y a peu les concepts développés par la recherche de l'expérience clinique au quotidien n'était pas propice à une appropriation de ces concepts par les praticiens, qui restaient plutôt perplexes face à la difficulté d'ajuster leur pratique quotidienne aux cadres théoriques proposés. À cet égard, les nouvelles tendances nosographiques vont certainement dans le bon sens, permettant à présent d'envisager des recherches prenant en compte certaines réalités cliniques comme le concept de comorbidité, qui pourrait livrer des enseignements précieux s'il s'avérait capable de déceler par exemple le substrat cérébral commun à certains troubles de la lecture et aux troubles du calcul ou de l'écriture. De manière générale, ce n'est que de la conjonction d'avancées issues à la fois de l'observation clinique et de la recherche fondamentale, de même que par une collaboration étroite avec le système éducatif, que pourront dans l'avenir être proposés des protocoles standardisés de dépistage, de prévention et de rééducation qui puissent réduire significativement l'impact encore trop important de ces troubles sur la réussite académique de ces enfants et plus largement sur la santé mentale de la population. Nous n'avons pas abordé dans cet article certaines entités qui représentent pourtant autant de questionnements pour le clinicien, comme la question épineuse de l'enfant précoce et dyslexique, chez qui le diagnostic est retardé par la mise en place de compensations spontanées qui tôt ou tard vont cesser leur fonction de compensation, entraînant l'enfant, souvent alors un adolescent, dans l'échec et le décrochage scolaires, d'autant plus douloureux qu'ils contrastent avec des compétences remarquables mais inutilisables. Il n'existe à notre connaissance aucune recherche en neuroimagerie sur cette éventualité pourtant relativement fréquente et particulièrement dévastatrice. Il en va de même pour toute une série de pathologies de la coordination motrice, que l'on classe faute de mieux dans la catégorie des dyspraxies, mais qui relèvent plutôt d'un trouble mal identifié des fonctions cognitives non verbales [52], qui mériterait également de faire l'objet de recherches neuroscientifiques spécifiques qui n'ont jusqu'ici pas encore été entreprises. Comme on le voit, il reste encore beaucoup à faire et l'exemple de l'utilisation thérapeutique de l'apprentissage musical n'est qu'un exemple parmi d'autres de la possibilité, hautement souhaitable, de faire se rejoindre la pratique rééducative, la pédagogie spécialisée et la recherche scientifique.

## RÉFÉRENCES

- [1] INSERM (2007). Expertise collective. Dyslexie, dysorthographe, dyscalculie. Bilan des données scientifiques. Paris : Les Éditions Inserm ; p.159-73.
- [2] Snowling M.-J, Dyslexia. Oxford, Blackwell, 2000.
- [3] Sprenger-Charolles L & Cole P, Lecture et dyslexie, Paris, Dunod, 2003.
- [4] Habib M. La Constellation des Dys : bases neurologiques de l'apprentissage et de ses troubles. Paris-Bruxelles : DeBoeck ed., 2014, 324 p.

- [5] Habib M, Giraud K. Dyslexia. Handbook of Clinical Neurology, vol. 111 : Pediatric Neurology. Eds : O. DULAC, M. LASSONDE, AND H. B. SARNAT, Eds. Amsterdam : Elsevier, 2013, pp. 229-236.
- [6] Elliott J G, & Grigorenko E L. The Dyslexia Debate. New York: Cambridge University Press, 2014.
- [7] American Psychiatric Association. DSM-5®. Diagnostic and statistical manual of mental disorders (5th ed.). Washington, DC: Author, 2013.
- [8] DSM-IV-TR. Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders, 4th edition-text revised. American Psychiatric Association, 2000.
- [9] Chaix Y. Troubles spécifiques d'apprentissage et de développement. Le nouveau regard du DSM-5. Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant (A.N.A.E.), 2014;26(128):11-17.
- [10] Fluss J, Bertrand D, Ziegler J, Billard C. Troubles d'apprentissage de la lecture : rôle des facteurs cognitifs, comportementaux et socio-économiques. *Développements*. 2009;1:21-32.
- [11] Paulesu E, McCrory E, Fazio F, Menoncello L, Brunswick N, Cappa SF, Cotelli M, Cossu G, Corte F, Lorusso M, Pesenti S, Gallagher A, Perani D, Price C, Frith CD, & Frith U. A cultural effect on brain function. *Nature Neuroscience*. 2000;3(1):91-6.
- [12] Siok WT, Perfetti CA, Jin Z, & Tan LH. Biological abnormality of impaired reading is constrained by culture. *Nature*. 2004;431:71-6.
- [13] Demonet JF, Taylor MJ, & Chaix Y. Developmental dyslexia. *Lancet*. 2004;363(9419):1451-60.
- [14] Turkeltaub PE, Gareau L, Flowers DL, Zeffiro TA, & Eden, GF. Development of neural mechanisms for reading. *Nature Neuroscience*. 2003;6:767-73.
- [15] Richlan F, Kronbichler M, & Wimmer H. Meta-analyzing brain dysfunctions in dyslexic children and adults. *Neuroimage*. 2011;56:1735-42.
- [16] Norton ES, Beach SD, Gabrieli JD. Neurobiology of dyslexia. *Curr Opin Neurobiol*. 2014 Oct 4;30C:73-8.
- [17] Hoefl F, Hernandez A, McMillon G, et al. Neural basis of dyslexia: A comparison between dyslexic and nondyslexic children equated for reading ability. *Journal of Neuroscience*. 2006;26:10700-8.
- [18] Lyytinen H, Guttorm TK, et al. Psychophysiology of developmental dyslexia: a review of findings including studies of children at risk for dyslexia. *Journal of Neurolinguistics*. 2005;18(2):167-95.
- [19] Raschle NM, Chang M, & Gaab N. Structural brain alterations associated with dyslexia predate reading onset. *Neuroimage*. 2010;57:742-9.
- [20] Raschle NM, Zuka J, & Gaab N. Functional characteristics of developmental dyslexia in left-hemispheric posterior brain regions predate reading onset. *PNAS*. 2010;109(6):2156-61.
- [21] Galaburda AM, Sherman GF, Rosen GD, Aboitiz F, & Geschwind N. Developmental dyslexia: four consecutive patients with cortical anomalies. *Annals of Neurology*. 1985;18:222-33.
- [22] Silani G, Frith U, Démonet JF, Fazio F, Perani D, et al. Brain abnormalities underlying altered activation in dyslexia: A voxel based morphology study. *Brain*. 2005;128:2453-61.
- [23] Brauer J, Anwander A, Perani D, Friederici AD. Dorsal and ventral pathways in language development. *Brain Lang*. 10.1016/j.bandl.2013.03.001.
- [24] Forkel SJ, Thiebaut de Schotten M, Dell'Acqua F, Kalra L, Murphy DG, Williams SC, Catani M. Anatomical predictors of aphasia recovery: a tractography study of bilateral perisylvian language networks. *Brain*. 2014 Jul;137(Pt 7):2027-39.

- [25] Halwani GF, Loui P, Rüber T, Schlaug G. Effects of practice and experience on the arcuate-fasciculus: comparing singers, instrumentalists, and non-musicians. *Front Psychol.* 2011 Jul 7;2:156.
- [26] Vandermosten M, Boets B, Wouters J, & Ghesquière P. A qualitative and quantitative review of diffusion tensor imaging studies in reading and dyslexia. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews.*2012;36(6):1532-1552.
- [27] Vandermosten M, Boets B, Poelmans H, Sunaert S, Wouters J, & Ghesquière P. A tractography study in dyslexia: Neuroanatomic correlates of orthographic, phonological and speech processing. *Brain.* 2012;135(3):935-948.
- [28] Saygin ZM, Norton ES, Osher DE, Beach SD, Cyr AB, Ozernov-Palchik O, Yendiki A, Fischl B, Gaab N, Gabrieli JD. Tracking the roots of reading ability : white matter volume and integrity correlate with phonological awareness in prereading and early-reading kindergarten children. *J Neurosci.* 2013;33(33):13251-8.
- [29] Darki F, Peyrard-Janvid M, Matsson H, Kere J, Klingberg T. Three Dyslexia Susceptibility Genes, DYX1C1, DCDC2, and KIAA0319, Affect Temporo-Parietal White Matter Structure. *Biol Psychiatry.* 2012;72:671-6.
- [30] Tallal P, & Piercy M. Defects of non-verbal auditory perception in children with developmental aphasia. *Nature.* 1973;241(5390):468-9.
- [31] Tallal P, Miller SL, Bedi G, Byma G, Wang X, Nagarajan SS, Schreiner C, Jenkins W.M, & Merzenich MM. Language comprehension in language-learning impaired children improved with acoustically modified speech. *Science.* 1996;271:81-3.
- [32] Nicolson RI, Fawcett AJ & Dean P. Time estimation deficits in developmental dyslexia: Evidence of cerebellar involvement. *Proceedings of the Royal Society of London, B. Biological Sciences.* 1995;259:43-7.
- [33] Rey V, De Martino S, Espesser R, Habib M. Temporal processing and phonological impairment in dyslexia. Effect of phoneme lengthening on order judgement of two consonants. *Brain Lang.* 2002;80:576-91
- [34] Wolff PH. Timing precision and rhythm in developmental dyslexia. *Reading and Writing.* 2002; 15(1):179-206.
- [35] Thomson JM & Goswami U. Rhythmic processing in children with developmental dyslexia: Auditory and motor rhythms link to reading and spelling. *Journal of Physiology.* 2008;102:120-9.
- [36] Nicolson R, Fawcett A, Dean P. Time estimation deficits in developmental dyslexia: evidence for cerebellar involvement. *Proceedings of the Royal Society.* 1995;259:43-7
- [37] Varvara P, Varuzza C, Sorrentino AC, Vicari S, Menghini D. Executive functions in developmental dyslexia. *Front Hum Neurosci.* 2014 Mar 7;8:120.
- [38] Lobier MA, Peyrin C, Pichat C, Le Bas JF, Valdois S. Visual processing of multiple elements in the dyslexic brain: evidence for a superior parietal dysfunction. *Front Hum Neurosci.* 2014 Jul 7;8:479.
- [39] Ruffino M, Gori S, Boccardi D, Molteni M, Facoetti A. Spatial and temporal attention in developmental dyslexia. *Front Hum Neurosci.* 2014 May 22;8:331.
- [40] Franceschini S, Gori S, Ruffino M, Pedrolli K, Facoetti A. A Causal Link between Visual Spatial Attention and Reading Acquisition. *Current Biology.* 2012;2(9):814-9.
- [41] Blau V, Van Atteveldt N, Ekkebus M, Goebel R, Blomert L. Reduced neural integration of letters and speech sounds links phonological and reading deficits in adult dyslexia. *Current Biology.* 2009;9(6):503-8.
- [42] Giraud K. *Troubles du traitement de la parole chez le dyslexique adulte.* (Doctoral Dissertation). L'Université de Toulouse, France, 2007.

- [43] Boets B., Op de Beeck H. P., Vandermosten M., Scott S. K., Gillebert C. R., Mantini D., Bulté J., Sunaert S., Wouters J., Ghesquière P. Intact but less accessible representations in adults with dyslexia. *Science*. 2013;342(6163):1244-51.
- [44] Hahn N, Foxe JJ, Molholm S. Impairments of multisensory integration and cross-sensory learning as pathways to dyslexia. *Neurosci Biobehav Rev*. 2014 Sep 29; 47C:384-392.
- [45] Wallace MT, Stevenson RA. The construct of the multisensory temporal binding window and its dysregulation in developmental disabilities. *Neuropsychologia*. 2014 Aug 13;64C:105-23.
- [46] Harrar V, Tammam J, Pérez-Bellido A, Pitt A, Stein J, Spence C. Multisensory integration and attention in developmental dyslexia. *Curr Biol*. 2014 Mar 3; 24(5):531-5.
- [47] Kujala T., Karma K., Ceponiene R., Belitz S., Turkkila P., Tervaniemi M., *et al*. Plastic neural changes and reading improvement caused by audiovisual training in reading-impaired children. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2001;98(18):10509-14.
- [48] Ecalle J., Magnan A., Bouchafa H., Gombert J.E. Computer-based training with ortho-phonological units in dyslexic children: new investigations. *Dyslexia*, 2009; 5(3):218-38.
- [49] Weiss AH, Granot RY, Ahissar M. The enigma of dyslexic musicians. *Neuropsychologia*. 2014;54:28-40.
- [50] Bishop-Liebler P, Welch G, Huss M, Thomson JM, Goswami U. Auditory temporal processing skills in musicians with dyslexia. *Dyslexia*. 2014 Aug;20(3):261-79.
- [51] Goswami U, Huss M, Mead N, Fosker T, Verney JP. Perception of patterns of musical beat distribution in phonological developmental dyslexia: significant longitudinal relations with word reading and reading comprehension. *Cortex*, 2013 ; 49(5):1363-76.
- [52] Rourke B. P. *Nonverbal Learning Disabilities: The Syndrome and The Model*. Guilford Press: New York, 1989.