

# Apport de la neuro-imagerie aux troubles des apprentissages

C. Farrer, N. Adam

## PLAN DU CHAPITRE

---

- Introduction
- Dyslexie développementale
- Dyscalculie développementale
- Troubles de l'acquisition de la coordination motrice
- Co-occurrence et comorbidités : une grille étiologique complexe
- Conclusion

### ***L'essentiel à retenir***

- Il existe une très forte disparité dans l'étude des bases cérébrales des différents troubles d'apprentissage avec une forte dominance de la dyslexie développementale.
- La dyslexie développementale est associée à des anomalies neuroanatomiques et neurofonctionnelles dans les régions pariétales, temporales et frontales gauches du réseau de la lecture ainsi qu'à des anomalies de connectivité entre ces régions.
- La dyscalculie développementale est associée à des anomalies neuroanatomiques et neurofonctionnelles dans les régions pariétales impliquées dans la représentation des quantités et les régions frontales impliquées dans les opérations mentales réalisées sur ces quantités, ainsi qu'à des anomalies de connectivité entre ces régions.
- Les quelques études sur les bases cérébrales des troubles de l'acquisition de la coordination motrice révèlent des anomalies neuroanatomiques et neurofonctionnelles dans les régions cérébrales impliquées dans le contrôle moteur et l'attention visuospatiale.
- Certaines anomalies neuroanatomiques et neurofonctionnelles observées dans les troubles d'apprentissage peuvent résulter des conséquences de ces troubles ou des stratégies de compensation mises en œuvre par les enfants.
- La comorbidité entre différents troubles d'apprentissage est importante et il reste à identifier les dysfonctionnements cérébraux spécifiques de cette comorbidité.

## **Introduction**

L'identification des dysfonctionnements cérébraux associés aux troubles spécifiques des apprentissages est indispensable à une meilleure compréhension de l'étiologie de ces troubles. Cette identification peut aussi favorablement influencer la pratique clinique tant sur le plan diagnostique que thérapeutique. Cette compréhension pourrait aider à l'identification de marqueurs de vulnérabilité qui permettraient de diagnostiquer plus précocement les enfants susceptibles de développer ces troubles. Sur le plan thérapeutique, ces connaissances pourraient optimiser des stratégies d'intervention voire permettre le développement de nouvelles prises en charge. La compréhension des bases cérébrales des troubles spécifiques des apprentissages s'est fortement développée ces 20 dernières années avec l'essor des techniques d'imagerie du cerveau qui ont permis de mettre au jour des dysfonctionnements concernant différents systèmes cérébraux impliqués dans les apprentissages de la lecture, du calcul ou de la coordination.

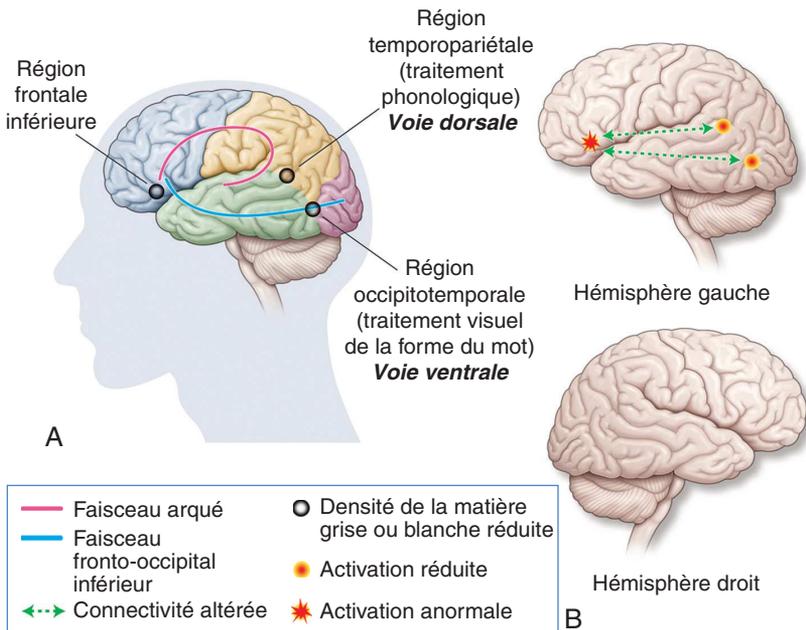
Ce chapitre décrit l'état des connaissances des dysfonctionnements cérébraux associés à la dyslexie développementale, à la dyscalculie développementale et aux troubles d'acquisition de la coordination motrice. Plusieurs considérations ont motivé l'organisation de ce chapitre, avec en premier lieu le choix de présenter ces troubles en rapport avec l'ancienne classification DSM-IV. Ce choix se justifie du fait que la très grande majorité des travaux décrits dans ce chapitre ont été menés à partir de cette classification. Un second choix a été d'aborder ces troubles indépendamment les uns des autres malgré l'existence d'une importante comorbidité de ces différents troubles entre eux. Ce choix est motivé par le nombre très faible d'études en neuro-imagerie portant sur les dysfonctionnements cérébraux spécifiquement associés à ces comorbidités. L'étude des bases cérébrales de la comorbidité n'en est encore qu'à ses débuts et sera très brièvement abordée à la fin de ce chapitre. Une autre limitation de cette revue se rapporte à une grande différence dans le nombre d'études en neuro-imagerie entre ces différents troubles. La dyslexie développementale a fait l'objet d'un très grand nombre d'études en neuro-imagerie comparativement à la dyscalculie, et davantage encore comparativement au trouble de l'acquisition de la coordination. En conséquence, il existe une grande inégalité dans la compréhension des dysfonctionnements cérébraux de ces différents troubles. L'état des connaissances des bases cérébrales est non seulement beaucoup plus avancé, mais aussi plus robuste dans la dyslexie que dans les autres troubles. Enfin, nous avons choisi de ne pas inclure la dysgraphie pédiatrique dans ce chapitre étant donné que ce trouble est très peu observé isolément et que les très rares études en neuro-imagerie ont été conduites chez des enfants qui présentaient d'autres troubles des apprentissages.

## Dyslexie développementale

L'apprentissage de la lecture est un processus long qui nécessite la mise en place de nouveaux circuits cérébraux entre les régions cérébrales impliquées dans la vision (reconnaissance des formes) et celles impliquées dans le langage oral [7], constituant ainsi le réseau cérébral de la lecture. Chez les individus dyslexiques, cette réorganisation cérébrale ne se fait pas correctement ou pas suffisamment pour permettre une lecture fluente, c'est-à-dire rapide et sans effort. Une lecture fluente repose sur l'intégration de traitements orthographiques (accès à la forme écrite des mots) et phonologiques (accès à la structure sonore des mots), lesquels sont sous-tendus par différentes régions cérébrales qui font partie du réseau de la lecture. Les nombreuses études sur les bases cérébrales de la dyslexie développementale montrent une grande cohérence dans les anomalies retrouvées chez les individus dyslexiques au niveau des deux voies du réseau cérébral de la lecture situées dans l'hémisphère gauche. La *voie dorsale* relie des régions du cortex frontal

inférieur gauche (qui inclut l'aire de Broca) et des régions temporopariétales gauches, incluant la partie postérieure du gyrus temporal supérieur et les régions pariétales adjacentes. Le dysfonctionnement de cette voie dorsale expliquerait les difficultés rencontrées par les individus dyslexiques dans le traitement phonologique (accès à la structure sonore des mots) et le décodage phonème-graphème [17]. Une seconde *voie ventrale* inclut le cortex occipitotemporal gauche, incluant le gyrus fusiforme, et les régions temporales inférieures et dont le dysfonctionnement expliquerait les difficultés de traitements orthographiques (accès à la forme écrite des mots) signalées chez des individus dyslexiques.

Les anomalies cérébrales observées dans le réseau de la lecture des individus dyslexiques touchent à la fois des aspects structuraux, ou neuroanatomiques, et des aspects du fonctionnement, ou neurofonctionnels, de ce réseau (figure 4.1). Parmi les principaux constituants neuroanatomiques, la matière grise, principalement constituée des corps cellulaires des neurones et de leurs dendrites, a fait l'objet d'un grand nombre d'études en neuro-imagerie chez des individus dyslexiques.



**Figure 4.1. Représentation schématique des altérations neuroanatomiques (spots noirs : déficit de matière grise ou blanche; traits colorés : faisceaux de matière blanche présentant des anomalies) (A) et des altérations neurofonctionnelles constatées chez les sujets dyslexiques (B).**

Les résultats de méta-analyses combinant plusieurs dizaines d'études en imagerie par résonance magnétique (IRM) montrent des réductions de volume de matière grise chez les individus dyslexiques en comparaison d'individus normolecteurs dans les régions temporopariétales de la voie dorsale et les régions occipitotemporales de la voie ventrale [17]. Ces déficits de matière grise ne sont pas pour autant immuables; ils peuvent être réduits suite à des entraînements avec des exercices d'articulation et d'imagerie mentale. Des enfants dyslexiques âgés d'environ 9 ans ayant bénéficié de ces interventions ont manifesté de meilleures performances de lecture et ces améliorations étaient accompagnées d'une réduction des déficits de matière grise dans les régions occipitotemporales.

Un autre constituant neuroanatomique, la matière blanche, principalement constituée des axones myélinisés des neurones, présente des volumes réduits chez les enfants et les adultes dyslexiques dans les régions temporopariétales gauches et le gyrus frontal inférieur gauche [13]. Des anomalies de matière blanche ont aussi été observées à l'aide de la technique d'imagerie du tenseur de diffusion au niveau de certains faisceaux de matière blanche qui constituent les principaux faisceaux de fibres reliant différentes régions du cerveau. Ces anomalies ont été observées au niveau du faisceau fronto-occipital inférieur et du faisceau arqué, lequel est connu pour son implication dans les traitements phonologiques.

Les études du fonctionnement du réseau cérébral de la lecture avec la technique d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) ont mis en évidence des différences d'activation cérébrale chez des individus dyslexiques par rapport à des normolecteurs dans la plupart des régions qui présentent des différences neuroanatomiques. Ces régions regroupent principalement la région temporopariétale, le gyrus frontal inférieur et la région occipitotemporale [12, 16]. Des différences neurofonctionnelles ont aussi été mises en évidence à partir d'autres techniques de neuro-imagerie fonctionnelle comme l'électrophysiologie (tableau 4.1).

Les anomalies neuroanatomiques et neurofonctionnelles observées chez les individus dyslexiques ont souvent été interprétées comme étant responsables de leurs difficultés en lecture. En effet, l'apparition très précoce de certaines anomalies, avant ou au tout début de l'apprentissage de la lecture, chez des enfants prélecteurs ou lecteurs débutants, confirme cette interprétation. Une réduction de matière grise dans les régions temporopariétales gauches et du gyrus fusiforme gauche du réseau de la lecture ainsi que des différences de matière blanche dans le faisceau fronto-occipital inférieur ont été observées chez des enfants prélecteurs avec une histoire familiale de dyslexie développementale. De plus, ces résultats sont cohérents avec l'observation que certains enfants qui vont développer une dyslexie développementale présentent des difficultés de langage oral avant tout apprentissage de la lecture.

**Tableau 4.1. Caractéristiques de l'activité neuronale observées à l'aide de la technique électroencéphalographie chez les sujets dyslexiques.**

Différences relatives ...		Différences chez les dyslexiques se manifestant par...
Aux rythmes	Thêta (5–7 Hz)	Une activité thêta frontale supérieure lors d'une tâche phonologique
	Alpha (8–12 Hz)	Une activité alpha supérieure : <ul style="list-style-type: none"> <li>– en régions frontales (traitement phonologique)</li> <li>– en région frontale gauche, temporale médiane et frontocentrale postérieure (perception de discours, lecture, traitement de non-mots)</li> <li>– en région temporopariétale (discrimination phonémique auditive)</li> </ul>
	Bêta (18–30 Hz)	Une amplitude de l'activité bêta supérieure dans la région pariéto-occipitale droite versus gauche lors de tâches visuelles et phonologiques
À l'activité des potentiels évoqués	N100	Une N100 réduite en région temporale gauche (écoute dichotique)
	N200	Une latence de la N200 plus importante lors de tâches de décision lexicale
	P300	Une localisation plus frontale d'une P300 assymétrique (distribuée de manière plus importante dans l'hémisphère droit que gauche) (pariétale chez les normo-lecteurs)
	N400	Une 400 atténuée chez les dyslexiques adultes, augmentée chez les dyslexiques enfants

Cependant, certaines différences neuroanatomiques, notamment de volumes de matières grise et blanche, pourraient ne pas être à l'origine des troubles de la lecture, mais au contraire être les conséquences de ces troubles eux-mêmes. Ces anomalies pourraient en effet s'expliquer par les différences d'expériences de lecture entre les personnes dyslexiques et les personnes non dyslexiques. Dans une récente étude, Krafnick et ses collaborateurs ont comparé le volume de matière grise d'enfants dyslexiques et non dyslexiques en appariant les enfants en fonction de leur âge ou en fonction de leurs performances à une tâche de lecture de mots isolés [10]. Les résultats ont montré que les différences neuroanatomiques observées s'expliqueraient par les différences au niveau de l'expérience de lecture entre les individus normolecteurs et dyslexiques. Chez les individus normolecteurs, l'amélioration des performances au cours des expériences de lecture s'accompagne d'une augmentation de matière grise dans les régions du cerveau de la lecture. Or, les expériences en lecture des individus normolecteurs sont non seulement de plus grande qualité, mais aussi plus

fréquentes que celles des individus dyslexiques. Ces différences de performance pourraient ainsi expliquer certaines différences neuroanatomiques observées chez les individus dyslexiques.

Ces résultats ne remettent cependant pas en cause l'hypothèse d'une origine neurodéveloppementale de la dyslexie développementale. Diverses sources de données montrent que le développement cérébral précoce est altéré chez les individus dyslexiques, comme en témoigne l'apparition de dysplasies corticales développementales. De plus, les études génétiques montrent l'implication de plusieurs gènes qui jouent un rôle dans la migration neuronale et le guidage des axones. Cependant, il reste encore à dissocier les anomalies cérébrales qui relèvent des causes de ces troubles et qui seront utiles à une meilleure compréhension de l'étiologie de la dyslexie développementale, des anomalies cérébrales qui relèvent des conséquences de la dyslexie du fait d'expériences de lecture plus appauvries chez les individus dyslexiques.

Ces études montrent que le réseau cérébral de la lecture chez les individus dyslexiques présente des différences à la fois au niveau de son organisation structurale et de son fonctionnement. Les techniques d'imagerie cérébrale fonctionnelle permettent de préciser davantage les mécanismes déficitaires en jeu dans la dyslexie développementale en étudiant plus spécifiquement les bases cérébrales des traitements phonologiques et visuo-orthographiques de la lecture chez les individus dyslexiques.

Le traitement phonologique (traitement des sons du langage) est particulièrement affecté chez les individus dyslexiques, et l'hypothèse phonologique comme déficit majeur, mais pas unique, de la dyslexie fait assez consensus. Les processus phonologiques sont impliqués dans la mise en place et l'automatisation des correspondances lettre-son qui permettent une lecture fluente. Par exemple, la conscience phonologique, qui permet de discriminer les sons proches d'une langue, se positionne comme un des indicateurs les plus robustes de la réussite en lecture. On constate d'ailleurs qu'une faiblesse de la conscience phonologique est souvent rapportée dans la dyslexie [13]. Malgré l'existence d'un consensus sur l'importance du déficit phonologique dans la dyslexie, la nature exacte des troubles phonologiques reste encore incertaine et fait toujours l'objet d'un vif débat. Le déficit phonologique pourrait s'expliquer par la qualité des représentations phonologiques dans le cerveau. Ainsi, les dyslexiques auraient une représentation dégradée et bien moins spécifiée des sons du langage, ce qui expliquerait que des sons proches mais distincts ne soient pas aussi bien différenciés que chez les normolecteurs. Une autre hypothèse met l'accent non pas sur les représentations phonologiques elles-mêmes, mais sur l'accès à ces représentations par d'autres régions du réseau de la lecture. En effet, une récente étude a révélé que les régions cérébrales comme le cortex auditif primaire, les gyri temporaux moyen et supérieur et le gyrus supra-marginal représentent et différencient les sons du langage de façon similaire (ces régions s'activent de la même manière) chez les individus dyslexiques et les normolecteurs [3]. Ce résultat suggère que les représentations phonologiques au sein de

ces régions sont les mêmes chez les individus dyslexiques et les normolecteurs. Cependant, les individus dyslexiques se distinguent des normolecteurs au niveau des schémas de connectivité fonctionnelle entre les gyri temporaux supérieurs, le cortex auditif primaire à droite et une région située dans le cortex frontal inférieur gauche, l'aire de Broca. L'aire de Broca est impliquée dans la mémoire de travail qui regroupe un ensemble de processus cognitifs qui permettent de retenir et manipuler mentalement les représentations phonologiques (par exemple pour réaliser une tâche de rimes). Une connectivité plus faible entre l'aire de Broca et les régions plus postérieures impliquées dans les représentations phonologiques se traduirait par un défaut d'accès à ces représentations qui entraverait leur utilisation pour la réalisation de certaines tâches langagières [15]. Cependant, malgré ces récentes avancées, le débat sur la nature du déficit phonologique reste encore ouvert.

L'apprentissage de la lecture nécessite de reconnaître et traiter rapidement de nouveaux objets, les mots écrits. Sur le plan cérébral, cela implique que certaines régions se réorganisent pour développer une nouvelle spécialisation qui est de traiter spécifiquement les mots écrits. Cette spécialisation va concerner une région dans le cortex occipitotemporal gauche, que l'on appelle l'aire visuelle des mots (ou VWFA pour *visual word form area*). Cette région est impliquée dans le traitement orthographique rapide de mots ou de suites de lettres présentées visuellement et présente une plus faible activation dans des tâches de lecture et de conversion visuophonologique chez les individus dyslexiques [12]. Ce dysfonctionnement apparaît tôt puisqu'une moindre activation de cette région occipitotemporale est observée chez des enfants dyslexiques dès l'âge de 9 ans dans des tâches de lecture de mots et de pseudo-mots [16]. Cette région présente aussi une plus faible connectivité avec les régions frontales inférieures du réseau de la lecture, qui suggérerait là aussi un déficit de connexion au sein du réseau de la lecture chez des individus dyslexiques.

La mise en évidence de plusieurs déficits neurocognitifs dans la dyslexie développementale pose la question des liens entre ces déficits et notamment de la prédominance d'un déficit en particulier. Un modèle très influent, le modèle standard, postule qu'un déficit phonologique primaire affecterait la conscience phonologique, laquelle compromettrait la construction d'un lexique orthographique, ce qui entraînerait un déficit orthographique. Selon ce modèle, il y aurait une progression développementale d'un dysfonctionnement phonologique dans la région temporopariétale gauche vers un dysfonctionnement visuo-orthographique dans la région occipitotemporale gauche. Cependant, une récente méta-analyse de Richlan et al. [16] ne permet pas de valider ce modèle sur le plan cérébral. Cette analyse montre que la région temporopariétale gauche présente une moindre activation chez les adultes dyslexiques mais pas chez les enfants dyslexiques, ce qui suggère que cette région n'est pas altérée précocement. De plus, cette étude révèle une sous-activation de la région

occipitotemporale gauche chez les adultes dyslexiques, mais aussi chez les enfants dyslexiques dès l'âge de 9 ans, ce qui pourrait témoigner d'une altération préliminaire de cette région. D'autres études sont nécessaires pour comprendre la dynamique de ces altérations dans le temps.

Les études sur la dyslexie développementale ont mis en évidence plusieurs dysfonctionnements cérébraux principalement situés dans l'hémisphère gauche. Ces anomalies concernent la région occipitotemporale impliquée dans le traitement visuo-orthographique de mots [17], les régions temporopariétale gauche et le gyrus frontal inférieur gauche, impliqués dans le traitement phonologique des mots, mais aussi la connexion de ces régions entre elles, entravant les traitements phonologiques et visuo-orthographiques, mais aussi l'intégration de ces différents traitements nécessaire à une lecture fluente. L'hypothèse que la dyslexie développementale est un trouble de la connexion cérébrale n'est pas récente puisqu'elle avait déjà été proposée par Geschwind dès 1962 [8], mais les récentes avancées en neuro-imagerie ont fortement renforcé cette hypothèse, notamment en montrant des différences de connexion cérébrale entre les individus dyslexiques et les normolecteurs à la fois sur le plan neuroanatomique et au niveau de la connectivité fonctionnelle du réseau de la lecture.

## Dyscalculie développementale

L'étude des bases cérébrales de la dyscalculie développementale n'a pas reçu la même attention que la dyslexie développementale, mais la convergence de plusieurs études permet de décrire un état de l'art des connaissances actuelles sur les bases cérébrales de ce trouble. Bien que plusieurs terminologies aient été proposées pour décrire ce trouble, nous utiliserons le terme de dyscalculie développementale pour caractériser à la fois les troubles du traitement des quantités et les troubles de calcul [5].

Avant tout apprentissage formel des mathématiques, les enfants possèdent déjà des représentations initiales des quantités et des grandeurs non symboliques. Ce « sens du nombre » permet par exemple de juger qu'une quantité est plus grande qu'une autre ou encore de faire des calculs très approximatifs sur des objets. Au cours de l'apprentissage des mathématiques, ces représentations de grandeur vont être associées à des représentations symboliques comme les nombres. L'enfant pourra alors comparer les nombres entre eux (par exemple savoir que 5 est plus petit que 10) et plus tard opérer des traitements arithmétiques de plus en plus élaborés sur ces nombres.

Un des déficits majeurs observés dans la dyscalculie développementale concerne le traitement des quantités et se manifeste pour des tâches aussi simples que de compter des petits ensembles d'objets ou de comparer deux rangées de points. Ce déficit, que certains auteurs qualifient de pure dyscalculie développementale,