



Méta-synthèse de l'état d'avancement de la recherche en neuro-éducation dans le domaine des troubles de l'apprentissage

Meta-synthesis regarding the progress of research in neuro-education within the field of learning disabilities

AARAB Sara

Doctorante

Faculté des sciences de l'éducation

Université Mohammed V de Rabat

Politiques éducatives et dynamiques sociales

Maroc

sara.aarab2@gmail.com

Date de soumission : 17/07/2020

Date d'acceptation : 30/08/2020

Pour citer cet article :

AARAB S. (2020) « Méta-synthèse de l'état d'avancement de la recherche en neuro-éducation dans le domaine des troubles de l'apprentissage », Revue Internationale du Chercheur «Volume 1 : Numéro 3» pp : 279 - 304



Résumé

L'article présent s'efforce de prouver que les travaux en neuro-éducation permettent d'approfondir les connaissances sur l'origine des troubles de l'apprentissage à travers le dressement de l'état d'avancement de la recherche probant en neuro-éducation au cours de la période allant de 2007 jusqu'à 2020. Pour cela, nous avons adopté la méthodologie de la méta-synthèse en s'inspirant des travaux de Beaucher et Jutras (2007). Cette méthode d'analyse va au-delà de la simple synthèse des résultats de recherches portant sur les causes des troubles de l'apprentissage. D'une part, la sélection et le filtrage des articles ont réduit le nombre d'articles retenus à 43 articles. D'autre part, on a organisé les éléments de codification puisés des caractéristiques des études retenues sous forme de matrice scientifique. Ainsi, les résultats indiquent que le faible décodage phonologique constitue la principale cause qui entrave l'apprentissage courant de la lecture en cas de dyslexie. La dyscalculie est due au dysfonctionnement de certaines zones du cortex pariétal et de la mémoire de travail. Le TDA/H est dû à plusieurs altérations au niveau de zones cérébrales spécialisées dans le traitement de la motivation et la récompense. Le TSA est le résultat d'un retard développemental au niveau du système neuronal miroir.

Mots clés :

neuro-éducation ; méta-synthèse ; troubles de l'apprentissage ; imagerie cérébrale ; neurones.

Abstract

The current article aims to prove that neuro-education studies contribute to deepening the knowledge of the underlying causes behind the occurrence of learning disabilities through the review of the progress of research in neuroeducation over the period 2007 to 2020. Thus, we proceeded by the method of meta-synthesis inspired by the work of Beaucher and Jutras (2007). This method of analysis goes beyond summarizing the results of recent research on the causes of learning disorders. In one hand, by selecting and filtering articles using inclusion and exclusion criteria we reduced the number of selected items to 43 articles. On the other hand, the coding elements drawn from the selected studies were organized as a scientific matrix. Thus, the results show that research on dyslexia has suggested that low phonological decoding is the cause that hinders the learning of reading. Research on dyscalculia reveals that it is due to the dysfunction of some areas of the parietal cortex as well as working memory deficit. Research on ADAH demonstrated a lower-than-normal level of some proteins in brain areas specialized in managing motivation and reward. Research on autism spectrum disorder has revealed that autism spectrum disorder is associated with childhood development delay of mirror neurons.

Keywords:

neuro-education; meta-synthesis; learning disabilities; brain imaging; neurons.



INTRODUCTION

Au cours des dernières décennies, la sphère du monde de l'éducation s'est trouvée dans l'obligation de répondre à un besoin accru de soutien, de réhabilitation et d'intégration des élèves en difficulté scolaire. En effet, au moment où le retard scolaire est invoqué pour justifier l'incapacité des enseignants à entamer un travail d'encadrement et d'accompagnement auprès des élèves souffrant de troubles développementaux des apprentissages, la réussite scolaire reste déterminée par leur capacité à se familiariser avec les particularités du fonctionnement cérébral nécessaire à la compréhension des causes derrière les opérations altérées en cas de dysfonctionnement cérébral.

De surcroît, bien que le cerveau soit un capital précieux il demeure fragile au cours de sa maturation (Guillery-Girard & Eustache, 2016). Il peut subir des pathologies chroniques ou transitoires susceptible de mettre en péril l'ensemble de la scolarité de l'enfant. Ainsi, pour optimiser le travail d'enseignement, il s'avère nécessaire de comprendre les limites et les atouts du système cognitif humain en situation d'apprentissage.

Ainsi, parallèlement aux domaines de recherche orientés vers la plasticité cérébrale et celui des processus cognitifs, un autre champ d'étude s'est développé en relation avec l'éducation et les neurosciences, donnant naissance à la neuro-éducation. En effet, de nombreuses études affirment que la recherche en neuro-éducation fournit des éléments de réflexion très intéressants qui d'une part, améliorent considérablement les possibilités pédagogiques des enseignants et qui, d'autre part, leur permet de recourir à des méthodologies d'enseignement plus compatibles avec le fonctionnement cérébral des élèves. Quoique le travail avec des élèves présentant des troubles d'apprentissage rend la tâche plus complexe, dans la mesure où il est question plus d'évaluer leur aptitude cognitive face aux tâches scolaires qui leur sont assignées pour distinguer la ou les causes qui entrave le processus de construction de la connaissance.

Or, d'autres recherches reprochent l'ingérence de la neuro-éducation, dans le champ éducatif, puisque les études publiées procurent des données brutes des neurosciences, pour ensuite confondre l'acquisition des connaissances sur le cerveau avec l'amélioration des pratiques pédagogiques (Gaussel & Reverdy , 2013). D'autre part, le réductionnisme pratiqué en neuro-éducation fait que le passage du laboratoire à la salle de classe soit laborieux puisque, les connaissances sur le fonctionnement cérébral ne suffisent pas à expliquer tous les processus mentaux liés à l'apprentissage dans la salle de classe (Gaussel , 2016).



Par ailleurs, les recherches actuelles indiquent l'existence d'une relation de cause à effet entre les troubles d'apprentissage et les dysfonctionnements dans les différentes aires du cerveau, dans la mesure où ces troubles provoquent une défaillance au niveau de la lecture et de l'écriture, du calcul, de même que des carences au niveau de l'attention/concentration, de la compréhension, de la reformulation, de la restructuration ainsi que d'autres fonctions exécutives. Ainsi, avec l'avènement de la neuro-éducation, les études sur le cerveau ont tenté d'apporter leur contribution en procurant des pistes de recherches qui concourent à la compréhension des dysfonctionnements cérébraux susceptible de nuire à la capacité de l'enfant à recevoir l'information, à la traiter, à l'analyser et à l'intégrer dans ses propres schèmes mentaux.

L'article présent a pour but d'élaborer une revue de littérature de type méta-synthèse des travaux récents effectués dans le domaine de la neuro-éducation susceptible de nous éclairer à propos des avancés concernant la problématique des troubles d'apprentissage. Il s'agit, dans ce cas, de tirer parti des études scientifiques effectuées tout au long des treize dernières années, allant de 2007 jusqu'à 2020, puisque la compréhension des mécanismes derrière le traitement d'une nouvelle information facilite la compréhension de l'origine des différents troubles. Cela permet de découvrir des formes de compensation adéquates pour s'y investir à fond. En bref, il est question à travers cet article d'approfondir les connaissances sur les causes derrière l'émergence de la dyslexie, de la dyscalculie, du trouble d'attention de même que le trouble du spectre autistique.

Dans la partie qui suit, il sera question d'exposer la démarche méthodologique de la méta-synthèse en procédant par ses différentes phases. La partie des résultats va porter sur la présentation des résultats des études retenues et sera succédé par une section dédiée à la comparaison et à l'analyse des études retenues afin de distinguer la contribution apportée par la recherche en neuro-éducation au domaine des troubles de l'apprentissage.

1. MATERIELS ET METHODES

Cette partie expose la démarche méthodologique privilégiée dans le cadre de cet article, qualifiée de méta-synthèse. Cette démarche consiste en la mise ensemble, la décomposition et l'examen des résultats afin de distinguer les éléments fondamentaux permettant de combiner les phénomènes étudiés dans un tout transformé (Beaucher & Jutras, 2007). Elle va au-delà de la simple synthèse à la construction de la connaissance de manière cumulative. Pourtant, le flux d'informations et le nombre d'études documentées peuvent entraver la



réussite de la méta-synthèse. Bien que certains prétendent que la méta-synthèse est une forme de recherche moins scientifique, Turgeon et Bernatchez affirment qu'il s'agit d'une alternative plus rigoureuse qui permet de récupérer les données dont on n'a pas extrait toute la valeur scientifique (Bernatchez & Turgeon, 2003, pp. 431-432). Ainsi, le flux des données documentaires recueillies doit être réduit selon une codification dans laquelle il est important de coder les divers segments des documents écrits pour leur donner un sens. Pourtant, la plupart des recherches ont montré qu'il n'existe pas de guide méthodologique précis à suivre pour l'élaboration d'une méta-synthèse sur une recension d'écrits, puisque l'essentiel consiste en la recherche d'un sens nouveau (Beaucher & Jutras, 2007).

1.1. Étapes de réalisation de la méta-synthèse

- ***Définition du problème***

L'étape préliminaire de cette méta-synthèse porte sur la définition du problème en question par l'identification de la question de recherche, auquel cette méta-synthèse doit apporter une réponse. Notre question est la suivante : Les travaux récents en neuro-éducation permettent-ils d'approfondir les connaissances sur les causes derrière les troubles susceptibles de porter atteinte à la performance scolaire de l'élève, notamment, les troubles dys, le TDA/H, le TSA ? L'objectif général de ce travail consiste à effectuer méta-synthèse permettant d'avancer une réflexion d'ensemble sur l'origine de la dyslexie, de la dyscalculie, du TDA/H ainsi que le TSA, pour déterminer l'état d'avancement actuel de la recherche en neuro-éducation.

1.2 Phase de préparation de la Meta synthèse

1.2.1 Choix des mots clés

Ce sont des mots clés puisés du cadre conceptuel de la recherche et identifiés dans le cadre de la recherche documentaire. Ils permettant l'élaboration d'indicateurs qui vont servir de cadre pour l'analyse des données.

A partir de ces indicateurs, il sera question de codifier les unités de sens des documents sélectionnés. Les mots clés suivants ont servi de point de départ de la recherche documentaire effectuée : la neuro-éducation, l'imagerie cérébrale, la dyslexie, la dyscalculie, le TDA/H, le trouble du spectre autistique.



1.2.2. Requête des articles dans les bases de données valables (séparément puis en pairage avec la thématique principale)

Une fois l'étape préliminaire effectuée, nous avons réalisé une recherche documentaire dans plusieurs bases de données informatisées à savoir Erudit, Cairn, etc. Nous avons, également, eu recours au moteur de recherche google scholar pour puiser les articles récents les plus pertinents. Il a fallu également consulter le site web de l'association pour la recherche en neuro-éducation, celui de l'institut de neurodidactique international de même que les articles publiés comme livrables des travaux effectués par certains laboratoires de recherche en France, au Canada et aux Etats Unis. A cet effet, la requête s'est effectuée sur deux phases. La première phase a consisté au lancement de la recherche sur chaque concept séparément de la thématique de la neuro-éducation, alors qu'à la deuxième phase, il a fallu effectuer la recherche en associant ces concepts à la thématique de la neuro-éducation.

Les résultats sont illustrés dans le *tableau 1*.

Tableau 1 : résultats de la recherche documentaire séparément puis en pairage

Concepts	(Nb d'articles) Séparément	(Nb d'articles) En pairage avec la thématique de la neuro-éducation
TDA/H	30	16
Dyslexie	46	19
Dyscalculie	29	22
Trouble du spectre autistique	55	17
TOTAL	160	74

Source : Aârab Sara

1.2.3 Sélection et filtrage des références obtenues

Une fois la présélection achevée, nous avons entamé la phase de sélection et de filtration des articles à analyser à travers laquelle nous avons conçu une fiche de catégorisation des critères d'inclusion et d'exclusion permettant de retenir les études les plus pertinentes.

Il a fallu collecter les données sur la base d'articles scientifiques publiés le long des années allant de 2007 jusqu'à 2020, soit sur les treize dernières années de recherche dans le domaine de la neuro-éducation.

Le choix des articles dépend, en grande partie, du résumé de l'étude de la renommée de l'auteur et de la réputation dont il jouit dans le milieu de la recherche scientifique, de son

expérience professionnelle de même que la durée et la qualité des études théoriques et empiriques.

La deuxième catégorie concerne les caractéristiques de l'échantillon, notamment, l'âge et le sexe des répondants, de même que la représentativité de l'échantillon.

La troisième catégorie se rattache aux caractéristiques méthodologiques et sert à dégager les types de données essentiels au filtrage et à l'analyse des études.

La **figure1** illustre l'ensemble des critères mentionnés au-dessus, nécessaire à la discrimination des études potentiellement admissibles dans la méta-synthèse.

Figure 1 : Fiche de catégorisation des critères d'inclusions/exclusion

<i>Fiche de catégorisation des critères d'inclusion/exclusion</i>
<u>Information sur la publication</u>
Résumé de l'article
Renommée de l'auteur
Type de publication
La date de publication
Présentation de l'état des connaissances
<u>Caractéristique de l'échantillon</u>
Taille de l'échantillon
Sexe et Age des répondants
Période couverte par l'étude
<u>Caractéristiques méthodologiques</u>
Types de données
Caractéristique du groupe de contrôle
Nature des variables de contrôle

Source : (Davies, Coutu-Wakulczyk, & Logan, 2011)

Ainsi, d'après ce processus de sélection des études probantes, il s'avère que parmi 74 articles sélectionnés, seulement 43 articles ont satisfait aux critères mentionnés ci-dessus, bien que la majorité des études sont anglo-saxonnes.

1.3 Phase de mise en pratique : codification des études

1.3.1 Extraction des données sur la base des caractéristiques des études retenues

Cette étape porte sur l'élaboration d'une grille de catégorisation des éléments de codification extrait des articles retenus prenant la forme d'une matrice scientifique (*voir le tableau 2*). Nous avons choisi comme éléments de codification les composantes suivantes : *l'objectif de la recherche, la pertinence de la recherche, la méthodologie utilisée, les devis de recherche en neuro-éducation, les retombées des études (résultats), les implications sur les concepts et sur les pratiques pédagogiques.*



Tableau 2 : Grille de codage des études retenues

<i>Intitulé de la recherche</i>	<i>l'objectif de la recherche</i>	<i>la méthodologie utilisée</i>	<i>les devis de recherche</i>	<i>les retombées des études</i>	<i>les implications sur les concepts</i>	<i>les implications sur les pratiques pédagogiques</i>

Source : (Beaucher & Jutras, 2007)

2. RESULTATS

2.1 Présentation des résultats

Étant donné que la méta-synthèse s'est effectuée au moyen de plusieurs éléments de codage, il s'avère nécessaire de présenter les résultats sous forme de tableaux organisés par ordre chronologique et regroupés selon les sous thèmes puisés de la variable « troubles de l'apprentissage ».

- **Tableau 3 : Tableau synthétique des études retenues sur la dyslexie**

	Intitulé	Objectif	Méthode d'expérimentation	Résultats
Etude n° 1	La dyslexie a une origine biologique. Mais on peut agir	Vérifier si les unités de parole qui ne sont pas bien identifiées par le cerveau perturbent les premiers apprentissages	Imagerie médicale	Faiblesse des activités qui font appel à la mémoire à court terme ou qui demandent de nommer rapidement des mots
Etude n° 2	Le temps des phonèmes	Analyse de l'intérêt apporté par les neurosciences au trouble de la dyslexie	IRM RMTD	-Les enfants aux prises avec une dyslexie tendent à distinguer les voyelles plus que les consonnes -le cerveau des dyslexiques se caractérise par son inaptitude à percevoir les variations promptes des stimulations acoustiques. -Les enfants dyslexiques présentent une réduction de l'activation de la région temporo-pariétale gauche
Etude n° 3	Dyslexie : plus d'espace entre les lettres faciliterait la lecture	Mise en avant de certains moyens permettant d'aider les dyslexiques à lire avec plus de facilité	IRM Test de lecture	Les dyslexiques ont du mal à discerner les lettres de manière individuelles souvent à cause des autres lettres qui les entourent.
Etude n° 4	Brain imaging study eliminates differences in visual function as a cause of dyslexia	Les différences au niveau du système visuel ne causent pas le trouble de dyslexie développementale, mais sont une conséquence.	IRM	Les différences dans le système visuel des enfants dyslexiques sont le produit final du manque de lecture par rapport aux lecteurs typiques et non pas la cause de ce trouble.
Etude n° 5	In dyslexia, less brain tissue not to blame for reading	Vérifier que la cause profonde de la dyslexie n'est pas liée la quantité de la matière grise dans	IRM	Les différences anatomiques dans les régions de traitement du langage de l'hémisphère gauche semblent être une



	difficulties	le cerveau		conséquence de l'expérience de lecture non pas une cause de dyslexie
Etude n° 6	Quel est le point commun entre être atteint de surdité ou de dyslexie ?	Vérifier s'il existe quelque chose de commun entre la dyslexie et la surdité	IRMf	En cas de difficultés au niveau phonologique (� cause d'une dyslexie ou d'une surdité), la région du cortex préfrontal et particulièrement la partie triangulaire qui se trouve dans le gyrus frontal inférieur prend la relève.
Etude n° 7	Spatial and temporal attention in developmental dyslexia	Vérifier que la dyslexie résulte d'un déficit d'intégration sonore de type lettre-parole simple.	IRMf	-L'attention spatiale et temporelle est altérée chez les dyslexiques avec un faible décodage phonologique - La déficience de l'attention visuelle est le déficit de base chez les dyslexiques ayant un décodage phonologique médiocre.
Etude n° 8	Scientists think they've identified the underlying neurological cause of dyslexia	Identifié la signature neurale permettant d'expliciter la raison pour laquelle les personnes atteintes de dyslexie ont du mal à interpréter l'information.	IRMf	Les sujets dyslexiques manifestent une adaptation réduite à l'imagerie répétée, avec la même signature neurale de l'activité supplémentaire du cerveau impliquée pour traiter les stimuli.
Etude n° 9	Dyslexics show a difference in sensory processing	Etude du degré d'adaptation cérébrale aux entrées sensorielles chez les sujets dyslexiques	IRMf	En cas de dyslexie, les difficultés d'adaptation neuronales affectent simultanément le traitement auditif et visuel pendant l'activité de lecture.
Etude n° 10	Targeting Dyslexia	Etude de Gaab (2015) : l'étude de l'état du faisceau arqué chez les enfants dyslexiques	-IRMf - la spectroscopie	-Le faisceau arqué gauche est moins développé chez les nourrissons ayant des antécédents familiaux de dyslexie - La possibilité de changé le traitement du langage de l'hémisphère gauche vers l'hémisphère droit permet d'améliorer la lecture
		Zeynep Saygin (2016) : Démontrer que la dyslexie est d'origine génétique.		La défaillance des connexions neuronales surgit chez les enfants des parents ayant une descendance dyslexique.
Etude n° 11	Dyslexia linked to shorter memory trace of previous stimuli	Mettre le point sur un nouvel aperçu des mécanismes cérébraux sous-jacents à une condition qui cause les difficultés de lecture et d'écriture.	IRMf	En cas de dyslexie la mémoire implicite est incapable de produire des prédictions efficaces et fiables pour les stimuli simples et complexes ce qui affecte négativement la lecture.
Etude n° 12	This is your brain on dyslexia	Etude des corrélations neurophysiologiques de l'adaptation perceptuelle chez les dyslexiques et les non-dyslexiques afin de distinguer les causes possibles de la dyslexie.	IRMf	La dyslexie ne se limite pas à la lecture mais elle est due à une réduction de l'adaptation neurale à une variété de stimuli perceptuels.
Etude n° 13	Left-right asymmetry of the Maxwell spot centroids in adults without and with dyslexia	Vérifier que la cause anatomique potentielle de la dyslexie est dissimulée dans de minuscules récepteurs des yeux des sujets atteints de dyslexie.	Fov�scope	L'absence de l'asymétrie au niveau de la fovéa (dans les deux yeux) semble être une source de confusion pour le cerveau, puisqu'elle crée des « images-miroirs » entre lesquelles le sujet dyslexique est incapable de choisir.
Etude n° 14	Neural correlates of phonological, orthographic and semantic reading processing in dyslexia	Identifier les caractéristiques de l'activité cérébrale de l'hémisphère gauche chez les lecteurs dyslexiques Face à l'usage des processus impliqués dans une lecture réussie : phonologique, orthographique et sémantique.	IRM	Une hypo-activation régionale associée aux processus phonologiques, orthographiques et sémantiques. Connectivité fonctionnelle plus forte entre les nœuds régionaux hypo-activés en cas de dyslexie. Forte connectivité sous-cortico-corticale entre les régions affichant des déficits



				pendant la lecture
Etude n° 15	The emergence of dyslexia in the developing brain	Distinguer l'origine neurobiologique de la dyslexie	IRMf IRM Tests d'épellation	La dyslexie peut provenir d'une maturation atypique du répertoire langagier qui précède l'alphabétisation.

Source : AARAB Sara

A partir des études présentées dans le *'tableau 3'*, il s'avère que la recherche sur la dyslexie a progressé même si elle n'est pas encore parvenue à déterminer la cause exacte derrière l'émergence de la dyslexie. En effet, l'étude réalisée en 2007 met en avant le fait que la dyslexie se borne à un trouble dû à une faiblesse dans les activités qui font appel à la mémoire à court terme ou qui demandent de nommer rapidement des mots. Or, certaines recherches publiées en 2012 sont allées plus loin en identifiant la dyslexie comme un trouble d'apprentissage de l'identification de mots écrits. Ces recherches ont attribué le trouble de dyslexie à une réduction de l'activité cérébrale au niveau de l'aire temporo-pariétale gauche faute d'existence d'une plus grande connectivité cérébrale entre l'hémisphère gauche et l'hémisphère droit des individus dyslexiques en plus du volume réduit de l'épaisseur dans certaines zones de la matière grise. Par la suite d'autres recherches ont abordé l'intérêt de l'espacement entre les mots et les lettres en cas de dyslexie comme méthode susceptible d'améliorer l'activité de lecture tant sur le plan de la rapidité que sur la qualité. Cette conclusion a donné lieu à d'autres travaux qui affirment qu'en cas de dyslexie la partie du cerveau qui traite l'information visuelle en mouvement est déficiente. Cependant, à partir de 2014 de nouvelles recherches viennent confirmer que les différences anatomiques signalées dans les régions de traitement du langage de l'hémisphère gauche ne semblent pas être la cause derrière l'émergence de la dyslexie mais plutôt c'est l'altération de l'attention spatiale et temporelle qui semble en être la cause. Ainsi, le faible codage phonologique fait que la région du cortex préfrontal prend la relève et plus particulièrement la partie triangulaire qui se trouve dans le gyrus frontal inférieur. Par ailleurs, les études publiées en 2015 ont attribué la dyslexie à des facteurs génétiques, dans la mesure où le faisceau arqué gauche demeure moins développé chez les nourrissons ayant des antécédents familiaux de dyslexie. Quant à l'étude publiée en 2016, elle attribue le trouble de la lecture à une faiblesse au niveau des connexions neuronales provoquant ainsi une réduction de 50% de la capacité des sujets à s'adapter aux sons par rapport aux lecteurs typiques. Ces difficultés d'adaptation neuronales affectent simultanément le traitement auditif et visuel pendant la lecture. En ce qui concerne l'étude publiée en 2017, celle-ci affirme que la dyslexie est due à une réduction de



l'adaptation neurale à une variété de stimuli perceptuels. Une autre étude réalisée à la fin de 2017 par les chercheurs français Albert Le Floch, Guy Ropars a démontré que La symétrie au niveau de la zone de la tache de Maxwell provoque une confusion pour le cerveau, puisqu'elle crée des « images-miroirs » entre lesquelles le sujet dyslexique est incapable de lire normalement. L'étude publiée en 2018 appuie l'existence d'une forte connectivité sous corticale associée aux processus phonologiques, orthographiques et sémantiques entre les régions hypo-activées en cas de dyslexie. Quant au résultat de l'étude réalisée en 2020, il attribue la dyslexie à une maturation anormale du répertoire langagier qui précède la reconnaissance de l'alphabet.

• **Tableau 4 : Tableau synthétique des études retenues sur la dyscalculie**

	Intitulé	Objectif	Méthode d'expérimentation	Résultats
Etude n° 1	Neuroanatomical correlates of developmental dyscalculia: combined evidence from morphometry and tractography	Examiner les déficiences macro et micro-structurelles chez les enfants dyscalculiques âgés de 7 à 9 ans pour une compréhension meilleure de la base neuro-anatomique de la dyscalculie développementale	- L'imagerie en tenseur de diffusion -La tractographie -L'analyse VBM	-La dyscalculie se caractérise par des circuits dysfonctionnels multiples issus d'un déficit au niveau de la substance blanche : les résultats identifient la région temporel-pariétale de l'hémisphère droit et les voies qui lui sont associées (le faisceau longitudinal inférieur, le faisceau occipito-frontal inférieur et le pinceau caudal majeur) comme corrélats neuro-anatomiques clés de la dyscalculie.
Etude n° 2	Cognitive subtypes of mathematics learning difficulties in primary education	Démontrer que les enfants ayant des difficultés d'apprentissage en mathématiques (MLD) constituent un groupe hétérogène.	-IRMf -La méthode des "K-means"	-Les enfants ayant des difficultés d'apprentissage en mathématiques MLD constituent un groupe hétérogène. -Il existe différents sous-types cognitifs de MLD qui peuvent être dérivés des approches axées sur les données de classification. Le sous-type de déficit d'accès est le plus spécifique et implique que les difficultés de déficit d'accès sont les meilleurs marqueurs de vulnérabilité cognitifs de MLD sévère.
Etude n° 3	Probing the nature of deficits in the 'Approximate Number System' in children with persistent Developmental Dyscalculia	Elucider le rôle de « Système numérique approximatif » dans la caractérisation des déficits cognitifs dans un échantillon d'enfants présentant une dyscalculie développementale persistante.	-Test de discrimination numérique non symbolique de Panamath -IRMf	- La dyscalculie développementale est causé par un déficit de base au niveau du système de nombre approximatif'. Ce déficit est entraîné par leur incapacité à inhiber les indices de perception visuels des stimuli des points pour choisir celle, numériquement, la plus importante.
Etude n° 4	Functional hyperconnectivity vanishes in children with developmental	Distinguer les ressources neuronales responsables de la réorganisation fonctionnelle destinée à la réduction des	-IRMf	- La formation au calcul mental entraîne une réorganisation de l'engagement interrégional des tâches dans la mesure où cette dernière réduit l'hyper-



	dyscalculia after numerical intervention	déficits dans le traitement de l'information numérique et mathématique		connectivité dans les régions pariétal, frontale, visuelle et temporelle.
Etude n° 5	Développement cérébral longitudinal des compétences numériques chez les enfants au développement "typique" et chez les enfants atteints de dyscalculie développementale	Fournir une première tentative pour l'étude longitudinale des trajectoires neuronales propre aux capacités numériques chez les enfants avec une dyscalculie développementale.	- IRMf	Les résultats indiquent un développement tardif des zones de traitement des nombres dans les régions pariétales chez les enfants dyslexiques.
Etude n° 6	Longitudinal brain development of numerical skills in typically developing children and children with developmental dyscalculia	Comparaison des trajectoires comportementales et neuronales des compétences mathématiques entre les enfants avec un développement typique et chez les enfants présentant une dyscalculie	Tests neuropsychologiques IRMf	Les résultats indiquent en cas de dyscalculie un développement typique de la représentation des nombres, alors que le réseau de neurones spécialisé dans l'estimation du nombre ordinal demeure stable et ne montre que des changements subtils au fil du temps en cas de développement typique.
Etude n° 7	Multi-method brain imaging reveals impaired representations of number as well as altered connectivity in adults with dyscalculia	Vérification de l'hypothèse proposée sur l'étiologie de la dyscalculie	IRM fonctionnel	La dyscalculie est liée à une déficience au niveau des représentations des nombres ainsi qu'une difficulté à accéder à ces représentations.
Etude n° 8	Excessive visual crowding effects in developmental dyscalculia	Distinguer si, en cas de dyscalculie développementale, un encombrement excessif se produit et s'il est diagnostiqué indépendamment des difficultés de lecture et d'attention associées.	IRM fonctionnel	Les résultats suggèrent que des effets d'encombrement excessifs semblent être une caractéristique de la dyscalculie, indépendamment des troubles neurodéveloppementaux associés.

Source : AARAB Sara

En se référant au **'tableau 4'** on remarque que les recherches sur la dyscalculie ont progressées avec le temps. En effet, les résultats de l'étude publiée en 2009 ont démontré, à l'aide de l'imagerie en tenseur de diffusion, que la dyscalculie se caractérise par des circuits dysfonctionnels multiples issus d'un déficit au niveau de la substance blanche, tandis que la morphométrie à base de voxel marque une diminution bilatérale de la matière grise dans les lobules pariétal supérieurs, le sillon intra pariétal, le gyrus fusiforme, le gyrus parahippocampique et le cortex temporel antérieur droit chez les sujets atteints de dyscalculie développementale. L'étude publiée en 2014 s'est focalisée plutôt sur la nature de la dyscalculie prouvant que le trouble d'apprentissage des mathématiques est un trouble hétérogène. Au fil du temps, les travaux de recherche ce sont remis de nouveau à la question de la cause derrière l'émergence de la dyscalculie. A cet effet, les travaux publiés en 2015 ne se sont pas mis d'accord sur l'origine de la dyscalculie. Certains attribuent la cause de ce trouble à un déficit de base au niveau du système de nombre approximatif, alors que d'autres l'associe à une déficience au niveau de la mémoire de travail visuo-spatiale. Cependant



l'année 2017 fut marquée par des publications mettant le point sur les facteurs de compensation d'ordre biologique chez les sujets atteints de dyscalculie. En effet, le développement tardif des régions pariétales provoque l'activation des zones frontales d'où l'utilisation de certains mécanismes compensatoires. Ces mécanismes de compensation peuvent également s'acquérir à travers la formation du boulier mental. Les résultats des deux études publiées en 2018 et en 2019 ont marqué le trouble dyscalculique par la persistance d'une déficience au niveau des représentations des nombres et à une difficulté à accéder à ces représentations-là. Par ailleurs, l'étude publiée en 2020 a mis le point sur les effets d'encombrement excessifs comme particularité propre au trouble de dyscalculie et diagnostiqué indépendamment des autres troubles associés.

• **Tableau 5 : Tableau synthétique des études retenues sur le TDA/H**

	Intitulé	Objectif	Méthode D'expérimentation	Résultats
Etude n° 1	Attention effects on auditory scene analysis in children	Vérifier que l'attention module la physiologie corticale en influençant l'acuité des processus auditifs dans l'analyse de la scène auditive chez les enfants d'âge scolaire	-EEG -EOG	-Le trouble de l'attention semble entraver la capacité à développer et affiner les processus automatiques d'organisation du son de sorte à influencer la perception.
Etude n° 2	ADHD Tied to Reward and Motivation Center in Brain	Déterminer le degré d'attachement du TDAH avec le système de récompense du cerveau et particulièrement les circuits neuronaux de la motivation et de la satisfaction.	- Tomographie par émission de positrons (TEP)	-Les sujets avec un TDAH/H présentent des carences au niveau des récepteurs dopaminergiques et des transporteurs dans le noyau accumbens et le milieu du cerveau (régions impliquées directement dans le traitement de la motivation et de la récompense).
Etude n° 3	Motivation et TDAH : le système de récompense du cerveau serait en cause	Vérifier que le degré de motivation, relatif à l'activité que les sujets avec un TDAH/H exécutent, est lié à la rapidité avec laquelle ils atteignent leurs objectifs.	IRM	-Les résultats montrent que le TDAH/H n'est pas seulement causé par des altérations du cerveau qui perturbent les processus cognitifs, mais il surgit aussi suite aux anomalies qui provoquent des carences de motivation.
Etude n° 4	TDAH et neuroscience	Les chercheurs tentent de répondre aux questions suivantes : -Le cerveau des personnes qui souffrent d'un TDAH est-il différent du point de vue morphologique du cerveau des témoins qui ne souffrent pas de ce trouble ?	IRM IRMTD Morphométrie cérébrale	-Il existe des différences morphologiques significatives entre le cerveau des sujets avec un TDAH/H et ceux au développement typique.



		<p>-Le cerveau des personnes qui souffrent d'un TDAH fonctionne-t-il différemment ?</p> <p>-La neurochimie du cerveau varie-t-elle en cas de TDAH ?</p> <p>-Quelles sont les causes des dysfonctionnements putatifs ?</p> <p>-Quelles sont les voies développementales menant aux anomalies cérébrales ?</p>	<p>l'électro-encéphalographie</p> <p>Technique des potentiels évoqués</p> <p>IRM fonctionnelle</p> <p>- La spectroscopie</p> <p>- La spectroscopie</p> <p>-IRMf</p>	<p>-Le cerveau des personnes qui souffrent d'un TDAH fonctionne-t-il différemment : la modulation inefficace des fluctuations de base du réseau neuronal interfère avec le fonctionnement optimal des circuits neuronaux qui sous-tendent l'exécution des tâches actives.</p> <p>- En cas de TDA/H il y'a possibilité d'altérations du ratio entre la créatine et plusieurs neurotransmetteurs qui régulent la dopamine, notamment, les composés de la choline, de la glutamine...</p> <p>- Contribution petite mais significative de plusieurs gènes liés au système dopaminergique (DRD4, DRD5, DAT1, HTR1B et SNAP25)</p> <p>-Il existe un retard de la maturation du cerveau d'environ trois ans chez les enfants atteint de TDAH</p>
Etude n° 5	La méditation et le TDAH touchent des régions du cerveau qui se chevauchent	Etablir un rapprochement entre l'épaisseur corticale dans les régions du cerveau responsables de la régulation de l'attention chez les adeptes de la méditation et les sujets aux prises avec un TDA/H qui ne pratiquent pas la méditation.	-IRMf -tests neuropsychologiques	Les sujets qui pratiquent la méditation font preuve d'une grande capacité d'absorption. Cette capacité d'absorption les rend plus habiles à se concentrer sur une source d'information précise, de même qu'à filtrer toute interférence. Ainsi, meilleure est la capacité d'absorption, plus grande est l'épaisseur corticale.
Etude n° 6	TDAH : la maturation du cerveau mise en cause	Vérifier que le TDA/H serait attribuable à un retard dans la maturation du cerveau.	IRMf EEG	-Le volume de certaines régions cérébrales situées sous le cortex est réduit chez les enfants présentant un TDA/H, notamment, l'amygdale, le noyau accumbens et l'hippocampe. -Le TDA/H est un trouble neurologique qui implique une sorte de retard au niveau du développement cérébrale pendant l'enfance.
Etude n° 7	Brain differences in ADHD	Vérifier qu'il existe une relation d'interdépendance entre L'amygdale, le noyau accumbens (traitement de la récompense) et l'hippocampe (origine de dérèglement de la motivation et des émotions).	IRMf	Les structures cérébrales (morphologie/volume des régions sous-corticales). Des sujets atteints de TDAH sont différentes -Il existe une relation de cause à effet entre l'amygdale, le noyau accumbens, l'hippocampe et le TDAH.
Etude n° 8	Functional neuroimaging evidence for distinct neurobiological pathways in attention-deficit/hyperactivity disorder	Tester le modèle des différentes voies neurobiologiques du TDAH	IRMf	Trois sous-catégories de TDAH sont identifiées sur la base du modèle en question : Un TDAH avec un problème d'inhibition motrice, Un TDAH avec un déficit au niveau des fonctions exécutifs et des neurones spécialisés dans la récompense Un TDAH avec une performance



				relativement normale. Or, aucune anomalie cérébrale n'est commune aux sous-catégories de ce trouble malgré la persistance de caractéristiques cliniques identiques.
Etude n° 9	Large-scale brain functional network topology disruptions underlie symptom heterogeneity in children with ADHD	Distinguer les variations de la connectivité fonctionnelle au niveau des réseaux neuronaux chez les enfants avec un TDAH combiné ou un TDAH inattentif et leur rapport avec les symptômes jaillissants.	IRM fonctionnelle	Cette étude révèle un grand déficit au niveau de la connectivité fonctionnelle du réseau cérébral chez l'enfant atteint d'un TDAH combiné plus qu'en cas de TDAH inattentif
Etude n° 10	Structural brain alterations and their association with cognitive function and symptoms in attention-deficit/hyperactivity disorder families	Distinguer les mécanismes cérébraux derrière le fonctionnement cérébral et les symptômes spécifiques au trouble déficitaire de l'attention chez les enfants	Analyse SBM	Les zones cérébrales dont l'activité appuie l'implication génétique en cas de TDAH se distinguent de l'activité des zones spécialisées dans la modulation de la sévérité des symptômes.

Source : AARAB Sara

En examinant les données du *'tableau 5'*, il s'avère que les recherches sur le trouble de l'attention ont progressé au fil du temps. On remarque que les premières études ont porté sur les effets du trouble de l'attention sur la motivation, le sentiment de satisfaction de même que le développement des processus de l'organisation des sons. Cependant, à partir de l'année 2011 de nombreuses recherches se sont intéressées à l'étude des différences morphologiques dans le cerveau des sujets atteints des TDA/H. Pour ce faire les chercheurs ont trouvé incontournable de recourir à la méta-analyse pour recenser les résultats des études effectuées à l'aide des techniques de l'imagerie cérébrale. La première méta-analyse s'est converti à la recension des résultats de l'IRM structurelle. Celle-ci a révélé que les zones du cerveau présentant des réductions marquées en surface ou en volume chez les de TDA/H incluent des zones spécifiquement impliquées dans l'organisation, le contrôle des mouvements, ainsi que le volume de l'hémisphère droit et celui du cerveau entier. Une seconde méta-analyse s'est focalisée sur les études réalisées à l'aide de la technique de la morphométrie cérébrale. Cette dernière a démontré que la perte du volume du putamen droit est significative en cas de TDA/H. quant à l'étude réalisée à l'aide de l'imagerie en tenseur de diffusion, elle a prouvé l'existence d'une altération de la connectivité structurelle dans les voies qui relient le cortex préfrontal droit aux ganglions de la base de même que les voies qui relient le gyrus cingulaire au cortex entorhinal. Par ailleurs, l'usage de l'IRM fonctionnelle a révélé une sorte d'hypoactivité frontale affectant diverses zones du cortex, des parties des ganglions de la base et du thalamus. L'usage de cette technique a dévoilé également la présence d'une hyper-



sensibilité au niveau du colliculus supérieur et de la noradréline, entraînant un manque de contrôle de l'attention visuelle et modifiant les saccades oculaires. Quoique, l'utilisation des potentiels évoqués a démontré que les anomalies s'étendent à de multiples structures du cerveau interférant avec le fonctionnement optimal des circuits neuronaux qui sous-tendent l'exécution des tâches actives. A leur tour, les données de la neuro-imagerie et les données neuro-psychopharmacologiques ont prouvé que le système dopaminergique, le système noradrénergique, le système sérotoninergique de même que le système cholinergique nicotinique sont impliqués dans la physiopathologie du TDAH. Toutefois, les études spectroscopiques préliminaires ont témoigné d'une altération du ratio entre la créatine et plusieurs neurotransmetteurs nécessaire à la régulation de la dopamine. D'autres études sont allées plus loin dans la quête des causes derrière les dysfonctionnements putatifs, dans la mesure où elles ont affirmé l'existence d'une contribution remarquable de plusieurs gènes liés au système dopaminergique. Tandis que, les études qui ont abordé la question qui traite des voies développementales menant aux anomalies cérébrales ont marqué l'existence d'un retard de la maturation du cerveau d'environ trois ans chez les enfants atteints de TDAH. Les années d'après furent marquées par la mise en œuvre des pratiques d'intervention auprès des sujets atteints de TDA/H. A cet effet, l'article publié en 2013 a abordé l'activité de médiation en tant que technique susceptible d'améliorer les capacités d'attention de ces derniers. L'étude publiée en 2017 a démontré que l'amygdale et le noyau accumbens sont à l'origine du dérèglement de la motivation de même que les émotions en cas de TDA/H, il demeure difficile de suivre exactement le déploiement de lésions cérébrales liées à la persistance de ce trouble. Par ailleurs, l'étude publiée en 2018 a mis en avant l'existence de trois sous-types de TDAH. Le premier associé à un problème d'inhibition motrice, le second associé à des difficultés au niveau du fonctionnement cérébral, alors que le dernier est marqué par une performance relativement normale avec l'absence de toute anomalie commune entre ces sous-types malgré les similitudes entre certaines caractéristiques cliniques du trouble. L'étude publiée en 2019 compare l'état de déficience dû à la perte du flux de connectivité fonctionnelle en cas de TDAH inattentif et en cas de TDAH combiné dont l'intensité de la connectivité s'avère élevée. Quant à l'étude publiée en 2020, elle met plus le point sur l'indépendance existante entre les zones cérébrales spécialisées dans la modulation de la sévérité des symptômes et celles dont l'activité cérébrale dévoile une implication génétique.



• **Tableau 6 : Tableau synthétique des études retenues sur le TSA**

	Intitulé	Objectif	Méthode d'expérimentation	Résultats
Etude n° 1	Why Autistic Children Do Not Imitate or Empathize: It Could Be A Dysfunctional Mirror-neuron System	Expliciter les mécanismes neurologiques derrière le comportement des enfants avec un spectre autistique.	-IRMf -IRI : indice de réactivité interpersonnelle	-La déficience du système neuronal miroir affecte négativement le comportement imitatif d'où les conséquences négatives sur le développement des éléments clés de la cognition sociale chez les enfants aux prises avec un spectre autistique.
Etude n° 2	Le syndrome du savant : Déficiences cérébrales et habiletés extraordinaires	Déterminer les dysfonctionnements cérébraux qui suscitent le surdéveloppement compensatoire de l'hémisphère, donnant lieu à des habiletés savantes.	Stimulation magnétique transcrânienne	- Le syndrome savant résulte d'un effet compensatoire de l'hémisphère droit ou une facilitation fonctionnelle (Réduction de l'interférence) pour contrer des lacunes au niveau de l'hémisphère gauche.
Etude n° 3	Troubles du spectre autistique et système de neurones miroirs	Vérifier si l'activité cérébrale des individus aux prises avec un TSA se caractérise par un dysfonctionnement au niveau du système neuronal miroir.	-MCG - ECG Stimulation magnétique transcrânienne -IRM	-Le système neuronal miroir dysfonctionnel constitue un substrat neuronal des déficits sociaux caractérisant ce trouble, notamment, la difficulté à imiter et à empathiser avec l'autre.
Etude n° 4	Mirror neuron system in autism: Broken or just slowly developing?	Vérifier que l'évolution du système neuronal miroir des sujets aux prises avec un TSA est simplement retardée.	-IRMf	-En cas de l'autisme, l'activité du système neuronal miroir demeure faible pendant l'enfance, pourtant elle augmente avec le temps. Elle devient normale à l'âge de 30 ans puis devient exceptionnellement élevée par la suite.
Etude n° 5	Holding a mirror to brain changes in autism	Comparer l'activité des neurones miroirs chez les sujets avec un TSA et les sujets en développement typique pour distinguer la cause derrière l'émergence de ce trouble.	Stimulation magnétique transcrânienne (TMS)	-L'activité déficiente des neurones miroirs entrave la capacité des sujets aux prises avec un TSA à interagir avec les autres.
Etude n° 6	No, autistic people do not have a "broken" mirror neuron system – new evidence	Remettre en cause de l'idée selon laquelle le trouble du spectre autistique est en quelque sorte causé par un système neuronal miroir brisé.	Electrographie EEG	-Bien que l'altération du développement du système miroir, soit un des facteurs déclencheurs du TSA, les problèmes d'interactions associées à ce trouble semblent être la conséquence d'une motivation sociale réduite.
Etude n° 7	Optical-imaging-based neurofeedback to enhance therapeutic intervention in adolescents with autism: methodology and initial data	Mettre en avant l'intérêt d'employer la neuro-feedback fondé sur les techniques de spectroscopie proche infrarouge dans la compréhension de l'activité cérébrale spécifique aux enfants avec un TSA.	fNIRS	-Les sujets avec le trouble du spectre autistique qui bénéficient de la neuro-feedback montrent une plus grande amélioration au niveau de la reconnaissance faciale par rapport à ceux qui n'en bénéficient pas.



Etude n° 8	Extra-axial cerebrospinal fluid in high-risk and normal-risk children with autism aged 2-4 years: a case-control study	Identifier le cas dans lequel le volume extra-axial du liquide céphalo-rachidien augmente chez les enfants autistes	IRM	Les résultats dévoilent que l'augmentation du volume extra-axial du liquide céphalo-rachidien semble être un biomarqueur d'un type d'autisme d'origine biologique caractérisé par la persistance d'une certaine physiopathologie.
Etude n° 9	Paternal—but not maternal—autistic traits predict frontal alpha asymmetry in infants with later symptoms of autism	Examiner l'effet médiateur de l'asymétrie frontale en alpha oscillation entre les traits autistiques chez les parents et les symptômes chez l'enfant dans la population générale	EEG	Les résultats de la recherche ont montré que les traits autistiques des parents sont dus à une forte asymétrie frontale gauche en alpha oscillation qui, à son tour, est associée à plus de traits autistiques chez l'enfant avec un effet significatif uniquement chez les nourrissons de sexe féminin par rapport aux nourrissons de sexe masculin.
Etude n° 10	Ventral stream hierarchy underlying perceptual organization in adolescents with autism	Enquêter sur les fondements neuronaux associés à l'organisation perceptive le long de la voie visuelle ventrale en cas d'autisme	IRMf	Les autistes font preuve d'une forte capacité à détecter les formes au sein des encombrements. -Les patterns organisés ont suscité des régions occipitales inférieures et les régions frontales supérieures. -les objets reconnaissables ont suscité une activité accrue au niveau du cortex latéral occipital.

Source : AARAB Sara

A partir des données **'tableau 6'**, on remarque que la trajectoire de la recherche sur l'autisme a subi une montée significative en termes de distinction des causes neurobiologique derrière ce trouble. D'une part, l'étude publiée en 2007 avance l'impact négatif du déficit du système miroir sur le comportement imitatif de l'élève. La même année fut marquée par la publication d'une autre étude qui s'est intéressé à l'émergence du syndrome savant. Ce syndrome surgit faute de l'effet compensatoire de l'hémisphère droit pour contrebalancer les lacunes au niveau de l'hémisphère gauche. Par la suite, les recherches sont allées plus loin en essayant de déterminer la cause exacte derrière l'émergence du syndrome savant. C'est le cas de l'étude publiée en 2010 qui a révélé que l'hémisphère droit essaie de réduire les interférences pour combler les lacunes au niveau de l'hémisphère gauche. Toutefois, il n'existe toujours pas de consensus concernant les causes exactes du syndrome savant. Une autre étude réalisée en 2010 s'est orienté vers le volet concernant les déficits sociaux qui marque le trouble du spectre autistique. Celle-ci a démontré que le dysfonctionnement du système neuronal miroir fait en sorte que l'imitation et l'empathie soit déficitaires. Pourtant, bien que le système neuronal miroir constitue un substrat neuronal des déficits sociaux qui distingue le trouble du spectre autistique, il n'existe toujours pas de marqueur biologique vraisemblable à ce trouble. Les années qui suivent ont témoigné d'une amélioration significative de la recherche sur le



trouble du spectre autistique. D'une part, l'étude publiée en 2011 vient pour réfuter le résultat de l'étude précédente qui stipule que le trouble de l'autisme est le résultat d'un système neuronal brisé. Or, l'étude présente vient affirmer que les sujets atteints de TSA présentent un retard développemental au niveau du système neuronal miroir. Pourtant, les recherches sur TSA ont connu une sorte de stagnation pendant certaines périodes, comme c'est le cas pour l'étude intitulée « Holding a mirror to brain changes in autism » publiée en 2012. En effet, en dépit des efforts déployés par l'équipe de recherche, les résultats de cette étude se sont contentés de distinguer l'altération de l'activité des neurones miroir comme élément de perturbation de la fonction sociale, sans aboutir à la compréhension substantielle de la base du cerveau en cas de TSA. Par contre, les résultats de l'étude publiée en 2016 ont associé la survenue de l'autisme à une manifestation réduite de la motivation sociale. Quant à l'étude publiée en 2017, elle est allée plus loin en s'appuyant sur la méthode de la neuro-feedback fondée sur les techniques de spectroscopie proche infrarouge afin de mieux saisir les spécificités du fonctionnement cérébral nécessaire à l'amélioration de l'intervention thérapeutique auprès des enfants avec un TSA. Par ailleurs, les résultats de l'étude publiée en 2018 ont mis le point sur l'existence d'un cas d'autisme d'origine biologique marqué par l'augmentation du volume extra-axial du liquide céphalo-rachidien. L'étude publiée en 2019 s'est, également, focalisée sur l'aspect héréditaire de l'autisme marqué par une forte asymétrie frontale gauche en alpha oscillation chez les parents présentant des traits autistiques et qui se reproduit de manière plus fréquente chez les nourrissons de sexe féminin. En ce qui est de l'étude publiée en 2020, cette dernière est allée plus loin en enquêtant les fondements neuronaux associés à l'organisation perceptive en cas d'autisme. Les résultats de l'étude ont dévoilé une forte capacité des autistes à détecter les formes au sein des encombrements. Cette capacité fait appel aux connexions neuronales au niveau du cortex latéral occipital.

3. DISCUSSION

L'analyse des objectifs, des méthodes d'expérimentation et des résultats des études retenues sur les troubles de l'apprentissage a permis de constater que la recherche en neuro-éducation est devenue, au fil du temps, de plus en plus coordonnée et cumulative, dans la mesure où les études se nourrissent les unes des autres. En effet, du point de vue des résultats, la recherche a connu un rythme ascendant caractérisé par certaines périodes de stagnation.



D'une part, les données sur la dyslexie indiquent qu'il existe des causes distinctes de dyslexie, étant donné que ce trouble-ci inclue de nombreux symptômes de nature phonologique, auditive, visuelle, spatiale, voire même motrice. La diversité de ces symptômes rend difficile l'identification des causes réelles de ce trouble étant puisque chacun de ces symptômes donne lieu à des spéculations théoriques, d'où plus d'une théorie explicative semble être correcte pour chaque sous-catégorie de la dyslexie (phonologique, visuo-spatiale, mixte). A travers l'analyse des études retenues, la recherche révèle que, parmi les hypothèses étudiées, celle qui attribue l'origine de la dyslexie à des anomalies au niveau de la migration neuronale semble la plus prometteuse. Ces anomalies entraînent un déficit cognitif dont les principales manifestations sont la faible conscience phonologique, la faible mémoire verbale à court terme y compris la lenteur dans la récupération des représentations phonologiques. Pourtant, la découverte des deux physiiciens français Albert Lefloch et Guy Ropars a affirmé que l'explication de la dyslexie se trouve au fond de l'œil. Cette étude a mis en avant la possibilité de l'implication de l'absence d'identification de l'asymétrie au niveau de la fovéa du système visuel dans la survenue de la dyslexie. Or, il s'avère difficile de vérifier la validité de cette hypothèse car elle a encore besoin de se consolider par des études complémentaires, sur des échantillons ciblés et représentatifs de lecteurs dyslexiques. Les études réalisées dernièrement associent, plutôt, la dyslexie soit à un problème de connectivité entre les aires du cortex associée aux processus phonologiques, orthographiques et sémantiques soit à un développement anormal du répertoire langagier au cours de la petite enfance. Ainsi, à l'issue des études analysées, il ressort clairement que malgré les différentes causes anatomiques qui ont déjà été citées, au niveau des corps calleux du cerveau, de l'organisation des neurones ou sur la base de la dernière découverte selon laquelle la cause de la dyslexie semble être liée à une malformation oculaire, les recherches ont mis le point sur le faible décodage phonologique au niveau de la partie triangulaire qui se trouve dans le gyrus frontal inférieur comme cause potentielle derrière la survenue du trouble de la lecture. Cependant, les recherches sont encore loin de déterminer la cause exacte de la dyslexie, vue qu'aucune cause mentionnée ne permet d'expliquer l'ensemble des symptômes et demeure incapable de répondre à la variabilité des profils quel que soit le système orthographique de la langue.

Par ailleurs, à travers l'étude des caractéristiques neurobiologiques associées aux troubles dyscalculique on est arrivé au fait que ce trouble renvoie à un dysfonctionnement des fonctions cognitives dont l'origine serait héréditaire. C'est dans ce contexte qu'il s'est avéré pos-



sible d'identifier comme principale manifestation de la dyscalculie la récupération des faits arithmétiques, dont la cause se rapporte soit à un déficit mémoriel soit à un déficit des fonctions visuo-spatiales ou l'immaturation de la fonction inhibitrice du cerveau. Les données sur la dyscalculie révèlent que le sillon intrapariétal n'est pas la seule région clé pour le traitement des nombres, étant donné que la capacité à traiter les nombres repose sur un grand nombre de régions cérébrales. En effet, les présents résultats mettent en avant l'existence d'une altération au niveau du fonctionnement de certaines zones du cortex pariétal, notamment, le sillon intra pariétal, le gyrus fusiforme, le gyrus parahippocampique de même que le cortex temporel antérieur droit, bien que la déficience au niveau de la mémoire de travail semble, aussi, déclencher la dyscalculie. Ainsi, le dysfonctionnement de ces régions empêche le développement de la représentation des nombres et génère un déficit spécifique au traitement numérique avec comme particularité, la persistance de certains effets d'encombrement excessifs diagnostiqués indépendamment des troubles associés. Pourtant, la recherche sur la dyscalculie n'en est qu'à son début puisque de nombreuses questions sont encore à aborder. Autrement dit, les études demeurent récentes et moins nombreuses dans le domaine des mathématiques comparativement au domaine de la lecture.

D'un autre côté, au travers des études analysées sur le TDA/H, il s'avère possible de dégager que la dérégulation de l'attention semble survenir d'un dysfonctionnement du réseau fronto-cortical, étant donné que l'activité cérébrale à l'échelle de ces régions semble réduite significativement chez les enfants et les adolescents atteints de TDAH. En effet, les études ayant attesté d'un retard développemental ou de maturation des zones frontales et corticales révèlent que le retard manifesté au niveau du développement des régions fronto-corticales provoque des décalages entre les stimuli reçus et les réponses données, d'où la déficience du processus attentionnel. Par ailleurs, les problèmes détectés au niveau de l'activité cérébrale semblent reconnus, également, sur la base de certaines fonctions primaires comme la motivation et la stimulation liée à l'environnement. Les travaux actuels exposent la défaillance de la mémoire de travail chez les enfants atteints de TDA/H par le biais des techniques de l'imagerie cérébrale comme l'EEG et l'IRMf. Cette défaillance résulte d'un problème au niveau de l'encodage de l'information. Les études effectuées à l'aide du TEP (potentiel électrique évoqué) considèrent que le diagnostic du TDA/H ne semble pas uniquement déterminé à partir du comportement mais aussi par le biais de la distinction du système cérébral altéré.



De ce fait, la trajectoire des recherches convertit à l'étude du TDA/H a connu une évolution considérable. D'une part, certaines études ont révélé que le déficit de l'attention est le résultat de plusieurs altérations au niveau des neurotransmetteurs qui régulent la dopamine. Ces altérations se manifestent dans les zones cérébrales impliquées dans le traitement de la motivation et de la récompense. Par ailleurs, d'autres études ont attribué le trouble déficitaire de l'attention à un retard de la maturation du cerveau d'environ trois ans par rapports aux enfants avec un développement typique ou bien à une implication génétique. Or, bien que les recherches publiées récemment ont abouti à l'idée que l'amygdale et Le noyau accumbens constituent une source de dérèglement de la motivation et des émotions chez les patients avec TDA/H, il reste difficile de suivre exactement le déploiement de lésions cérébrales liées à la persistance de ce trouble du fait de l'hétérogénéité et la complexité des facteurs déclencheurs de ce trouble.

A travers l'analyse des études portant sur le trouble du spectre autistique, il semble qu'il n'existe pas de cause unique et définitive propre à ce trouble. En effet, la majorité des études analysées révèlent que le développement cérébral et la manière dont s'organisent et se connectent les neurones miroirs semble déficiente chez les sujets atteint de TSA. Cette déficience surgit faute de la défectuosité de plusieurs gènes engendré par l'interaction avec l'environnement. Ainsi, l'influence de l'environnement peut, en présence de certaines anomalies génétiques, impacter le développement du cerveau. D'autres études plus récentes ont convergé vers le fait que le TSA se caractérise par la manifestation des symptômes comme l'hyper-connectivité neuronale au sein d'une même région cérébrale ou l'hypo-connectivité entre différentes régions du cerveau. Ces symptômes expliquent l'émergence de certaines capacités exceptionnelles comme le syndrome savant de même que le problème de la faible cohérence centrale. Toutefois, ceci n'informe point sur les causes exactes de ce trouble. Ainsi, du point de vue génétique, l'analyse des études retenues a permis de confirmer que le trouble du spectre autistique n'est par le résultat d'un système miroir brisé mais il est plutôt dû à l'évolution retardée du système neuronal. Cette déficience au niveau du système neuronal miroir entrave l'évolution des éléments clés de la cognition sociale, notamment la capacité à imiter de même qu'à sympathiser avec les autres. Toutefois, les recherches effectuées dernièrement ont avancé l'importance des techniques de la spectroscopie proche infrarouge dans la compréhension des spécificités cérébrales nécessaire à l'adaptation de l'intervention en cas



de besoin. A cet effet, il semble que la recherche sur le trouble du spectre autistique s'est bien enrichit.

En ce qui est de la qualité méthodologique des études, celle-ci s'est nettement améliorée passant d'essais classiques, utilisant des méthodes de recherche plus ou moins directes, notamment les techniques de l'imagerie structurale, les questionnaires y compris les observations à des essais utilisant des techniques d'imagerie cérébrale plus développées accompagnées de tests ou d'échelles. En effet, il semble que la combinaison des méthodes d'imagerie cérébrale avec les échelles et les tests psychologiques a facilité le décryptage des facteurs qui sont derrière les différents dysfonctionnements cérébraux. On remarque, par ailleurs, que la collecte des données cérébrales implique dans certaines études une collecte des données comportementales. En effet, en plus des scanners cérébraux, les chercheurs colligent les données comportementales, notamment, le taux des bonnes réponses de même que le temps de réaction pendant la réalisation de la tâche assignée au cours de l'expérimentation. Le recours à ces nouvelles méthodes permet de déterminer les altérations au niveau des substrats neuronaux susceptible de nuire au fonctionnement cérébral de l'enfant. Ces méthodes permettent, également, de distinguer les effets bénéfiques d'un type particulier d'intervention pédagogique sur le cerveau et à ouvrir l'existence à d'immenses possibilités pédagogiques voire didactiques. Toutefois, les techniques les plus utilisées à partir des études analysées sont l'IRMf et l'EEG en vue de leurs nombreuses qualités et de leur complémentarité. On retient également une grande variabilité méthodologique tant au niveau des devis de recherche utilisés (IRM, IRMf, ECG, MEG, TEP, VBM (morphométrie à base de Voxel), technique de stimulation...) que celui des designs des études. En effet, la spécification des objectifs au fil des années a contribué à l'amélioration du design des études et du type de technique d'imagerie cérébrale à privilégier.

Sur le plan de l'efficacité, la plupart des études les plus récentes permettent de proposer plusieurs modèles d'intervention capables de favoriser l'intervention et le traitement des troubles qui entrave le bon déroulement des apprentissages. Ils mettent le point, également, sur l'intérêt de différencier les pratiques enseignantes en fonction des forces et des faiblesses respectives des apprenants pour les adapter aux spécificités cérébrales de chacun.



CONCLUSION

Pour conclure, les recherches dans le champ de la neuro-éducation ont évolué de manière considérable pendant la décennie allant de 2007 jusqu'à 2020, notamment, les travaux qui se sont convertis à l'étude des causes derrière l'émergence des troubles d'apprentissage comme la dyslexie, la dyscalculie, le TDAH et le TSA. Ainsi, en ce qui concerne la dyslexie, la recherche a abouti à l'idée qu'elle résulte d'une faible conscience phonologique. En cas de dyscalculie, la recherche a prouvé que l'hyper-connectivité au sein d'une même zone distincte du cortex pariétal et l'hypo-connectivité entre plusieurs zones du cortex pariétal constituent des facteurs déclencheurs du trouble dyscalculique. En cas de TDA/H, les recherches ont conclu que les altérations au niveau des neurotransmetteurs qui veillent à la régulation de la dopamine et de la noradrénaline réduisent l'activité des régions cérébrales spécialisées dans le traitement de la motivation et la récompense. En cas de TSA, il s'avère que les anomalies génétiques retardent le développement du système neuronal miroir, compte tenu du rôle de l'interaction avec l'environnement dans l'aggravation de l'état d'isolement et d'antipathie chez l'enfant.

Ainsi, les résultats de cette recherche ont permis de relever les contributions apportées par la recherche en neuro-éducation, dont les perspectives semblent prometteuses. En effet, les résultats de ce travail favorisent :

- la compréhension de la nature et de la complexité des facteurs stimulateurs des dysfonctionnements cérébraux, même si, certaines études présentent des lacunes méthodologiques concernant soit la population étudiée, soit les épreuves administrées, d'où l'aboutissement à des conclusions plus au moins satisfaisantes.
- la prise de connaissance des effets d'une intervention pédagogique sur le cerveau, mais plus encore à la prise de connaissance des effets de différents types d'enseignement ou d'intervention sur le cerveau.
- le pourvoi des pistes de recherche pour aider les enseignants à améliorer certaines pratiques pédagogiques et didactiques à la lumière des recherches effectuées en neuro-éducation.

Or, ce champ d'étude demeure vierge et suscite plus d'attention et d'effort de la part des spécialistes de l'éducation de même que l'exploitation des points forts de certaines approches innovantes en pédagogie tel que le Design Thinking (Benckroun & Soulami, 2020).



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Beaucher, V., & Jutras, F. (2007). Étude comparative de la métasynthèse et de la méta-analyse qualitative VOL. 27(2). Retrieved Février 2017, from Recherches qualitatives: <http://www.recherche-qualitative.qc.ca/revue/>

Benckekroun, B., & Soulami, M. (2020). Design Thinking: Une nouvelle approche d'innovation pédagogique. *Revue Internationale des Sciences de Gestion*, Volume 3(Numéro 2), pp. 1241-1253. doi:<https://doi.org/10.5281/zenodo.3829780>

Bernatchez, J., & Turgeon, J. (2003). Recherche sociale : de la problématique à la collecte des données. (G. Benoît, Ed.) Sainte-Foy, Québec: Presses de l'Université du Québec.

Davies, B., Coutu-Wakulczyk, G., & Logan, J. (2011). Lire des textes de recherche : Guide convivial pour infirmiers et autres professionnels de la santé. Toronto: Mosby Elsevier.

Dehaene, G. (2014, mars 11). Mon cerveau à l'école. Retrieved mars 2017, from Mon cerveau à l'école: La Magnétoencéphalographie (MEG): <http://moncerveaualecole.com/la-magnetoencephalographie-meg/>

Dehaene, S., & Le Bihan, D. (2016, Février 16). Imagerie cérébrale : percer les mystères du cerveau. NeuroSpin Retrieved avril 2017, from: <https://www.frm.org/imagerie-cerebrale-percer-les-mysteres-du-cerveau>

Delécraz, J. (2016, Décembre 13). Tout sur la neuroéducation : qu'est-ce que c'est, à quoi sert-elle et comment l'appliquer dans les écoles et à la maison. Retrieved Avril 2017, from Cognitif, Santé, Cerveau & Neurosciences: <https://blog.cognifit.com/fr/la-neuroeducation/>

Dubois, M., & Roberge, J. (2010). Troubles d'apprentissage: pour comprendre et intervenir au cégep. Retrieved 2017, from Troubles d'apprentissage: <http://www.ccdmd.qc.ca/correspo/>

Gaussel, M. (2016, février). Développer l'esprit critique par l'argumentation : de l'élève au citoyen. Dossier de veille de l'IFÉ(n°108). Récupéré sur <http://veille-et-analyses.enslyon.fr/DA/detailsDossier.php?parent=accueil&dossier=108&lang=fr>

Gaussel, M., & Reverdy, C. (2013, septembre). Neurosciences et éducation : la bataille des cerveaux. Dossier d'actualité Veille et Analyse(n° 86). Récupéré sur <http://veille-et-analyses.enslyon.fr/DA/detailsDossier.php?parent=accueil&dossier=86&lang=fr>



Guillery-Girard, B., & Eustache, F. (2016). La neuroéducation la mémoire au cœur des apprentissages. Paris: Odile Jacob.

Marta, A., & Savoie-Zajc, L. (2009). L'analyse qualitative des données volume 28, numéro 1. Retrieved Mars 2017, from Association pour la recherche qualitative: [www. recherche-qualitative.q c. c a / revu e.html](http://www.recherche-qualitative.qc.ca/revue.html)

Masson, S. (2017, JUILLET 10-13). Mieux comprendre le cerveau pour mieux enseigner:une introduction à la neuroéducation. Retrieved Avril 2017, from Laboratoire De Recherche En Neuroéducation: <http://www.labneuroeducation.org/formation-en-france/>

Masson, S., & Brault Foisy, L.-M. (2014 , January). Fundamental Concepts Bridging Education and the Brain. Retrieved May 2017, from ResearchGate: <https://www.researchgate.net>

OCDE. (2007). Comprendre le cerveau : naissance d'une nouvelle science de l'apprentissage. Paris: Editions de l'OCDE.

Pasquinelli, E. (2014). Du labo à l'école : science et apprentissage. PARIS: Le Pommier.

Tardif, E., & Doudin, P.-A. (2016). Neurosciences et cognition: perspectives pour les sciences de l'éducation. Paris: De Boeck supérieur.