



**HAL**  
open science

## Les dernières découvertes sur la dyslexie

Océane Bousquet

► **To cite this version:**

Océane Bousquet. Les dernières découvertes sur la dyslexie. Sciences du Vivant [q-bio]. 2022. dumas-04002152

**HAL Id: dumas-04002152**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04002152>**

Submitted on 23 Feb 2023

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



Faculté des sciences  
médicales et paramédicales  
Aix-Marseille Université

Ecole des Sciences de la Réadaptation  
*Ecole d'Orthoptie*

# Les dernières découvertes sur la dyslexie.

BOUSQUET Océane

Maître de mémoire :  
MONTICOLO Chloé  
Orthoptiste

Directrice des mémoires :  
TRINQUET Laure  
Directrice de la formation

Année universitaire 2021-2022  
Mémoire de fin d'études d'Orthoptie

## **Remerciements :**

Avant même de commencer, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Tout d'abord, j'adresse une attention très particulière à ma maîtresse de mémoire Mme MONTICOLO Chloé, orthoptiste et enseignante à l'université, pour sa patience, son professionnalisme, sa précieuse aide, et ses nombreuses connaissances transmises pour ce travail, mais aussi durant les trois années d'école.

De plus, je tiens à remercier notre directrice pédagogique de l'Université d'Aix-Marseille et notre enseignante, Mme TRINQUET Laure pour sa grande implication dans notre formation, son dynamisme et sa persévérance afin de toujours faire du mieux possible pour contenter ses élèves.

Je remercie également les enseignants que nous avons eus lors des trois années passées pour leur investissement et leur accompagnement, ainsi que nos différents maîtres de stages pour le temps qu'ils nous ont accordé afin de développer nos connaissances pratiques.

Enfin, je souhaite dire un grand merci à mes proches, notamment mes parents pour leur précieux soutien au quotidien, à me pousser toujours à aller vers l'avant. Je suis reconnaissante de la chance que j'ai d'avoir des amis qui m'ont entouré et encouragé lors de cette formation. Enfin j'exprime de la gratitude à ma pratique sportive, et tous les bienfaits qu'elle procure sur la santé mentale, ce qui m'a permis de tenir l'équilibre dans les moments difficiles.

## **Résumé :**

La dyslexie est un des troubles des apprentissages les plus étudiés, et se rapporte à des difficultés persistantes de la lecture, malgré un entraînement accru. L'acquisition de la lecture étant un processus complexe, la dyslexie peut alors se manifester de différentes façons. Aujourd'hui, nous en savons beaucoup sur ce trouble, mais pas encore suffisamment. En effet, les scientifiques ont évoqué de multiples théories tentant d'expliquer son origine, ou plutôt ses origines, car la dyslexie aurait des causes multifactorielles.

Grâce aux progrès de la science, de nombreuses études continuent à être effectuées, et donnent lieu à de nouvelles découvertes. Malgré les compensations qui existent, un des principaux objectifs pour les années à venir, reste de trouver un ou des traitements adéquats, durables, et prouvés scientifiquement pour faciliter le quotidien des sujets qui en souffrent.

## **Mots clés :**

Avenir – Causes – Dyslexie – Recherches – Prévalence – Théories – Traitements

## **Abstract :**

Dyslexia, is one of the most studied learning disorders, and relates to persistent reading difficulties reading, despite increased training. As the acquisition of reading is a complex process, dyslexia can manifest itself in different ways. Today, we know a lot about this pathology, but not enough yet. Indeed, scientist have evoked multiple theories that attempt to explain its origin, or rather its origins, because dyslexia would have multifactorial causes.

Thanks to advances in science, many studies continue to be carried out, and give rise to new discoveries. Despite the compensations that exist, one of the main objectives for the coming years, is to find one or more adequate, sustainable, and scientifically proven treatments to facilitate the daily life of subjects who suffer from it.

## **Key words :**

Dyslexia – Future – Prevalence – Reasons – Researches – Theories – Treatments

## **TABLE DES MATIERES :**

<b>Introduction :</b> .....	1
<b>I. Qu'est-ce que la dyslexie ?</b> .....	2
1. Un des troubles des apprentissages. ....	2
2. Différentes formes de dyslexies.....	3
a. <i>La dyslexie phonologique.</i> .....	4
b. <i>La dyslexie de surface.</i> .....	4
c. <i>La dyslexie mixte.</i> .....	5
3. L'apprentissage de la lecture, un processus très pointilleux.....	5
<b>II. L'évolution des découvertes, une intermodalité des théories.</b> .....	6
1. Le chemin cérébral de la lecture. ....	7
a. <i>La théorie du traitement phonologique.</i> .....	8
i. Les conséquences d'une compensation par l'hémisphère droit.....	8
ii. Des différences neuro-anatomiques : matière grise, et substance blanche. ....	9
iii. Une aire spécifique grâce à la plasticité cérébrale. ....	10
2. La théorie sensorimotrice. ....	11
a. <i>Un déficit auditif sous-jacent ?</i> .....	11
b. <i>La théorie visuelle.</i> .....	12
i. Deux grands systèmes au traitement visuel. ....	12
ii. Lien entre dyslexie, mouvements oculaires et fonction visuelle.....	14
iii. L'empan visuel. ....	14
c. <i>Une partie liée au stress visuel, plus ou moins corrigée par les filtres colorés.</i> .....	17
i. L'usage des filtres colorés améliore la lecture. ....	18
ii. Couleurs spécifiques à chaque individu, voire même sans aucune influence... ..	19
<b>III. Nous aurions enfin trouvé la cause de la dyslexie ? Pas si vrai...</b> ....	20
1. L'étude d'Albert Le Floch et Guy Repars. ....	20
a. <i>La répartition des photorécepteurs.</i> .....	20
b. <i>Détermination de l'œil dominant.</i> .....	21
c. <i>Estimation de la taille des tâches de Maxwell.</i> .....	23
2. Les résultats. ....	24
3. Les limites. ....	27

<i>a. Une origine génétique associée ?</i> .....	28
<b>IV. Des remédiations fiables et durables.</b> .....	29
1. Les nouvelles technologies.....	29
<i>a. Le Eye-Brain, un outil de diagnostic</i> .....	30
<i>b. Les lampes, et lunettes « astucieuses »</i> .....	30
<i>c. Le système MoveR, thérapie immersive de rééducation</i> .....	32
<i>d. La diversité des applications et jeux interactifs</i> .....	33
2. D'autres techniques.....	33
<i>a. Le traitement proprioceptif</i> .....	33
<i>b. Les livres, et écritures spécifiques</i> .....	35
<b>Conclusion :</b> .....	38
<b>Bibliographie :</b> .....	40
<b>Lexique :</b> .....	46
<b>Annexes :</b> .....	47
<b>Article :</b> .....	50

## **Introduction :**

La première fois que le trouble dyslexique a été découvert remonte au début des années 1900 par des médecins anglais, dont Dr Pringle MORGAN qui est le premier à le nommer. Depuis, de nombreuses recherches ont été réalisées. L'étude de la dyslexie est en constante évolution, de ce fait, il n'existe pas qu'une seule définition, elles sont nombreuses mais se rejoignent sur un point commun : une origine neurologique avec un fonctionnement atypique du cerveau. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (l'OMS), « la dyslexie relève d'une difficulté durable d'apprentissage de la lecture et d'acquisition de son automatisme chez des enfants intelligents, normalement scolarisés et indemnes de troubles sensoriels ou psychologiques préexistants ».

En ce qui concerne la prévalence du trouble, Mr Habib et Mr Giraud rappellent qu'elle varie suivant les critères diagnostiques, les méthodes d'évaluation ainsi que les facteurs socioculturels et économiques.

Aujourd'hui, en France, 5 à 8 % de jeunes ayant dix ans environ seraient touchés, et la dyslexie représenterait entre 8 et 12 % de la population mondiale. La dyslexie touche trois fois plus les garçons, et se retrouve davantage chez les gauchers. Mal pris en charge, ce trouble vient perturber sérieusement la vie scolaire et même la vie quotidienne des sujets. Il est alors indispensable que les enfants soient pris en charge le plus tôt possible, par une équipe pluridisciplinaire, dans laquelle intervient notamment l'orthoptiste.

Ainsi, nous allons nous questionner sur les dernières avancées scientifiques pouvant expliquer la dyslexie, afin de faciliter par la suite le quotidien des sujets.

Dans un premier temps, nous allons voir ce qu'est concrètement la dyslexie, et la lecture dont l'apprentissage résulte d'un processus complexe. Dans un second temps, l'évolution des découvertes, avec les différentes théories possibles pour expliquer les causes de la dyslexie, ainsi qu'une étude qui a fait beaucoup parler d'elle ces derniers temps. Et enfin, nous verrons les nouveaux outils proposés pour tenter de compenser ce trouble.



# **I. Qu'est-ce que la dyslexie ?**

La dyslexie est un des troubles « dys », se caractérisant par une perturbation dans la mise en place des apprentissages dans un domaine spécifique. Elle a été définie suite à un témoignage d'un garçon de quatorze ans énonçant : « je ne comprends pas ce que j'ai : je suis intelligent, doué pour les mathématiques ; si mon professeur ne cotait que mes réponses orales, je serais premier de la classe ; mais malheureusement je suis dernier parce que mes camarades même peu doués apprennent sans difficulté ce qui malgré tous mes efforts m'est impossible : lire et écrire ».

## **1. Un des troubles des apprentissages.**

Les troubles des apprentissages dont fait partie la dyslexie, correspondent à une atteinte persistante affectant une ou plusieurs fonctions cognitives. Ils doivent être distingués de la « simple » difficulté. En effet, les troubles des apprentissages s'installent durablement dans le temps, se manifestent différemment au cours de la vie, ainsi ils ne pourront pas être remédiés, mais seulement compensés par diverses méthodes, suivant le profil de l'individu.

La dyslexie survient chez un enfant d'intelligence normale, sans aucun déficit intellectuel ou sensoriel, et scolarisé normalement. Elle ne résulte ni d'un manque de volonté d'apprendre ni d'un contexte familial défaillant.

Actuellement, il existe deux grandes classifications utilisées à l'échelle mondiale lorsque vient le temps d'évaluer un individu, afin de poser ou non un diagnostic. La CIM (Classification Internationale des Maladies) qui est gérée par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), avec une nouvelle édition (la CIM 11) rentrée en vigueur en Janvier 2022. Le DSM (Manuel Diagnostique et Statistique des Troubles Mentaux), lui est géré par l'Association Américaine de Psychiatrie et a publié la 5<sup>ème</sup> édition (DSM-5) en 2013.

La dyslexie renvoie à un trouble spécifique du langage écrit, plus précisément à un trouble spécifique de la lecture. Elle est cependant à différencier de la dysorthographe correspondant à un trouble spécifique de l'orthographe, très fréquemment associée à la dyslexie.

La dyslexie est un trouble primaire de la lecture, et résulte d'une anomalie du traitement de texte écrit au sein du système cérébral. Ce trouble se caractérise par des difficultés de reconnaissance visuelle précise et/ou fluide des mots, et par de faibles capacités d'orthographe et de décodage. Ces difficultés sont inattendues par rapport aux autres capacités cognitives de l'enfant.

Néanmoins, l'ensemble des sujets dyslexiques ne présente pas les mêmes difficultés de lecture, différentes formes de dyslexies ont été décrites, et peuvent être radicalement opposées.

## 2. Différentes formes de dyslexies.

Diagnostiquer un individu comme étant dyslexique n'est pas simple, de nombreux éléments sont à prendre en considération ; le DSM-5 a alors établi différents critères pour aider les professionnels. (cf. figure 1) [1]

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

*Figure 1* : Critères diagnostiques des troubles spécifiques d'apprentissage, d'après le DSM-5.

En revanche, deux formes de dyslexies bien distinctes peuvent être répertoriées, en fonction de la présence de lésions cérébrales :

- *La dyslexie acquise* : il s'agit de troubles de lecture consécutifs à un traumatisme ou à une lésion cérébrale.

- *La dyslexie développementale* : celle à laquelle nous allons nous intéresser tout le long de ce travail.

Il s'agit de l'ensemble des difficultés spécifiques de l'enfant qui se développe au cours du temps, lors de l'apprentissage de la lecture.

La lecture est une opération cognitive, qui consiste à analyser un message écrit, codé en lettres, en mots et en phrases, avec pour objectif premier de comprendre le sens du texte. Or, l'enfant dyslexique rencontre de nombreuses lacunes : il a une lecture très lente et fatigante, cela va avoir des répercussions sur l'identification des mots écrits ainsi que sur la compréhension globale d'un texte. Les enfants dyslexiques n'éprouvent aucun plaisir à lire, cela peut même devenir une angoisse, si bien qu'un vocabulaire peu diversifié peut être retrouvé chez eux. Dans une moindre mesure, cela peut engendrer une mauvaise estime de soi, et une perte totale de confiance.

De façon plus concrète, voici comment un enfant dyslexique va percevoir un texte :  
« les garsçons jou dans le jardin. Ils son ballon juenes. Les filles s’amse avec pita  
cheche, le petit chat de la voisine. Il ne ve pus jou pelote de lene rouge et re carte les  
garsçons. Le chat et pénibe avec eux. A lorre il sarrte de jou. »

Alors que le texte original était : « les garçons jouent dans le jardin. Ils ont un ballon  
jaune. Les filles s’amusent avec pistache le petit chat de la voisine. Il ne veut plus jouer  
avec sa pelote de laine rouge et regarde les garçons. Le chat est pénible avec eux alors  
ils arrêtent de jouer. »

D’après la classification de Boder - celle la plus connue en matière de dyslexie- il existe  
trois grands types de dyslexie, avec des symptômes variant d’une forme à l’autre : la  
dyslexie phonologique, la dyslexie de surface, et la dyslexie mixte. [2]

#### *a. La dyslexie phonologique.*

La dyslexie phonologique, ou dysphonétique est le signe d’un déficit de la voie  
d’assemblage et des difficultés de lecture des non-mots. Il s’agit de la forme la plus  
fréquente (près de 60 %).

La voie d’assemblage permet l’analyse visuelle. Chaque mot est segmenté en unités,  
nous parlons de graphèmes. Chacune de ces unités orthographiques est associée à une  
unité phonologique, correspondance graphème/phonème, puis ces différentes unités  
sont assemblées pour former la synthèse. Concrètement en lecture, l’enfant éprouve de  
grandes difficultés à déchiffrer les nouveaux mots et a tendance à davantage les  
deviner, car il n’arrive pas à automatiser les conversions graphèmes-phonèmes.

Significativement des confusions phonémiques sont retrouvées entre le v et b, ou  
encore des omissions de lecture. Un exemple de paralexies verbales : « bergerie » lu  
« berger », ou des paralexies sémantiques où « père » est lu « papa ».

#### *b. La dyslexie de surface.*

La dyslexie de surface, ou dyséidétique fait référence à un trouble visuo-attentionnel,  
signe d’un déficit de la voie d’adressage qui se manifeste par une incapacité à  
automatiser la lecture à partir de la forme visuelle des mots. Cette forme représente  
entre 10 et 20% des personnes dyslexiques.

La voie d’adressage est la voie qui permet au sujet de retrouver le mot lu dans son  
lexique orthographique. Cela permet d’accéder au système sémantique, et de retrouver  
sa forme phonologique dans le lexique phonologique. L’enfant ici a des confusions sur  
les mots qui se ressemblent phonétiquement par exemple « belle et balle », il va  
éprouver des difficultés à épeler certains mots car son orthographe reste phonétique  
« éléphant » va être épelé « éléfan ».

### c. *La dyslexie mixte.*

La dyslexie mixte correspond aux signes de difficultés dans les deux voies. Cette dyslexie ne touche que 20% des cas, mais elle est néanmoins la plus handicapante. Le lexique interne de l'enfant est souvent très faible ce qui donne une lecture très laborieuse, et souvent incomprise. À terme, cela peut entraîner une alexie, c'est-à-dire une incapacité complète pour lire alors que le système visuel est intact.

Il existe d'autres formes de dyslexies, qui n'ont pas été répertoriées par Mr Boder, comme la dyslexie motrice se caractérisant par des difficultés à mémoriser les mouvements permettant d'écrire. Il y a aussi la dyslexie visuo-attentionnelle, où l'enfant est perturbé par l'environnement. C'est un trouble affectant l'attention nécessaire à l'activité de lecture, si bien que le sujet a par exemple tendance à inverser les lettres « fragile » devient « fargile », à sauter des lignes.

Ainsi, la lecture est un mécanisme complexe, qui repose sur de nombreuses facettes... Son acquisition demande un bon développement cortical, avec des expériences répétées dans le temps, afin qu'elle devienne par la suite un automatisme.

### 3. L'apprentissage de la lecture, un processus très pointilleux.

Selon le modèle de Frith, datant de 1985. Il existe trois stades successifs dans l'apprentissage de la lecture. (Annexe 1)

1) Le stade logographique, la « pré-lecture » : l'enfant ne sait pas lire, il cherche à identifier le mot de la même façon qu'il décrit un dessin, puisque la correspondance graphème-phonème n'est pas encore acquise. Nous lui donnons seulement l'illusion de lire, en lui apprenant à reconnaître de façon globale certains mots, comme la reconnaissance de son nom et prénom en petite section.

2) Le stade alphabétique, la « lecture » : au passage en CP, l'enfant commence à acquérir la correspondance sons/lettres ou groupes de lettres, la segmentation et l'assemblage, grâce à l'écriture, et à sa capacité à manipuler la phonologie de sa langue. La reconnaissance des mots ne se fait donc plus à partir d'indices visuels, mais grâce à des règles de correspondance entre oral et écrit.

3) Le stade orthographique : l'enfant va être capable de reconnaître un mot, comme un ensemble d'unités synthétisées, grâce à un stockage sous une forme stable appelée « lexique orthographique ».

Un bon lecteur utilise les différentes procédures en fonction de ses besoins. Le développement du langage oral joue un rôle essentiel dans l'apprentissage de la lecture. Ainsi, contrairement à la parole, la lecture et l'écriture ne se développent pas naturellement et nécessitent un apprentissage actif.

Par ailleurs, la prédominance de la dyslexie est influencée par la transparence orthographique d'une langue, caractérisée par le nombre de graphèmes en corrélation avec le nombre de phonèmes. Par exemple, l'anglais et le français sont phonétiquement deux langues compliquées, qui présentent un taux plus important de personnes dyslexiques par rapport aux italiens.

En effet, la lecture demande l'acquisition de multiples facteurs liés à l'expérience, aux capacités et au fonctionnement neurologique d'une personne. Ainsi, diverses compétences sont sollicitées pour lire : des compétences langagières, mnésiques avec la mémoire de travail, attentionnelles et exécutives en faisant appel aux stratégies de regard. Ces dernières prennent quatre à cinq ans pour se mettre en place, et s'automatisent au cours du primaire. Et enfin, des compétences sémantiques sur la pertinence de la prononciation de certains mots par ex : « les poules du couvent couvent », « nous éditions de belles éditions ».

## **II. L'évolution des découvertes, une intermodalité des théories.**

Dans le cas d'une dyslexie développementale, la recherche de ses causes constitue un des objectifs des travaux scientifiques. Cette recherche est effectuée dans différents domaines et selon des méthodes très diversifiées, dans le but de trouver le maximum de preuves possibles. Des études peuvent être menées sur un seul sujet dyslexique, pour mettre en évidence des profils « représentatifs » d'une des formes de dyslexies ; tandis que d'autres s'intéressent à une plus vaste population susceptible de représenter la dyslexie, en étudiant les points communs et les différences. Souvent dans les études de groupes, les chercheurs comparent les résultats des sujets dyslexiques, avec les normo-lecteurs.

- Les recherches génétiques qui visent à mettre en évidence certaines anomalies chromosomiques.
- Les recherches épidémiologiques qui s'intéressent à plusieurs milliers d'enfants à travers le monde entier, afin d'évaluer la prévalence du trouble et son caractère spécifique.
- Les recherches réalisées par autopsie de cerveaux de personnes dyslexiques décédées accidentellement, pour comparer leur architecture et leur organisation cellulaire par rapport à des lecteurs sans lacune.
- Les recherches électro-physiologiques qui visent à relever des éléments particuliers d'activité électrique du cerveau, ou un mécanisme spécifique des potentiels évoqués chez les enfants rencontrant de grosses difficultés dans la lecture, ou chez des adultes qui ne sont pas parvenus à apprendre à lire.
- Les recherches basées sur l'imagerie médicale, pour tenter d'objectiver des différences fonctionnelles entre bons et mauvais lecteurs.

- Les recherches visant à étudier les mouvements oculaires pendant la lecture ou pendant des tâches d'identification de lettres ou de couleurs, en vision périphérique, parafovéale et fovéale lors d'une fixation.

Suite à une utilisation de plus en plus accrue des méthodes d'imageries cérébrales, de nombreuses découvertes ont pu voir le jour. Celles-ci ont permis de développer différentes théories possibles vis-à-vis de la dyslexie.

La théorie dite « phonologique » a été prédominante pendant environ 20 ans avec pour origine un dysfonctionnement cérébelleux. Mais progressivement, de plus en plus d'études ont émergé et fournissent des preuves sur une théorie plus « sensorimotrice » qui serait davantage basée sur les déficits phonologiques, auditifs, ou encore un problème du système magnocellulaire.

### 1. Le chemin cérébral de la lecture.

La lecture repose sur un mécanisme complexe de la part de notre cerveau, où différentes aires sont impliquées. Il n'existe donc pas une aire naturelle dédiée à la lecture. Chaque hémisphère cérébral a un rôle bien précis, l'hémisphère gauche intervient pour la lecture et l'orthographe, tandis que l'hémisphère droit renvoie principalement à l'orientation, la coordination et les émotions. (Annexe 2)

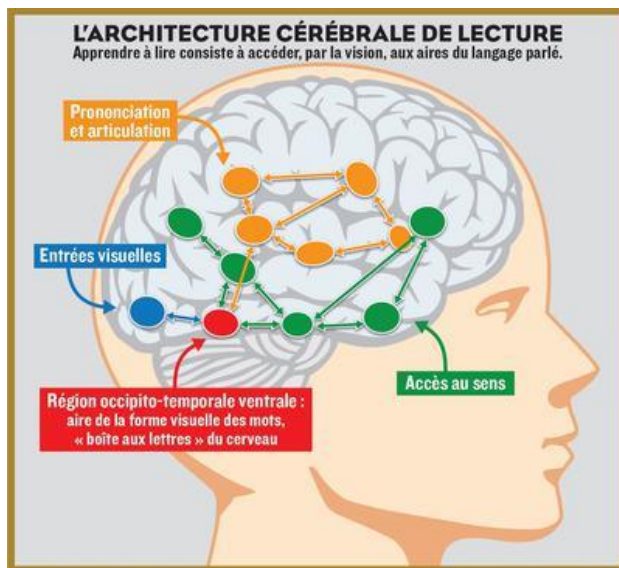
C'est ainsi que Stanislas Dehaene, et le neurologue Laurent Cohen ont découvert que lors de l'apprentissage de la lecture se développe un circuit fonctionnant de la même manière pour la majorité des personnes. Effectivement, grâce à la plasticité cérébrale, apprendre à lire met simplement en place une nouvelle « porte d'entrée » vers le langage qui passe par la vision plutôt que par l'audition. Puis se développe une zone cérébrale de la forme visuelle des mots, cachée dans la région du cortex occipito-temporal de l'hémisphère gauche, où les aires cérébrales vont collaborer les unes aux autres. Grâce à l'utilisation de l'IRM fonctionnelle, cela a permis de montrer que la lecture chez les normo-lecteurs correspond à différentes zones. (cf. figure 2) [3]

La *première* zone comprend le gyrus temporal supérieur- avec notamment l'aire de Wernicke- et le lobe pariétal inférieur qui vont créer la « boîte aux lettres » pour ensuite permettre la représentation des graphèmes sur phonèmes.

La *seconde* zone implique le gyrus frontal moyen qui surveille l'analyse des éléments phonologiques et articulatoires, un rôle d'autant plus facilité par sa proximité des centres moteurs de la bouche et de la langue. Celle-ci est combinée à l'arrière de ce même gyrus, où nous retrouvons l'aire de Broca qui contribue à la mémoire de travail. Il a récemment été suggéré que les gyri angulaire et supramarginal interviendraient aussi très rapidement sur les lettres et leur ordre dans les mots, plutôt que d'associer la forme visuelle d'un mot et sa signification.

Et, la *troisième* comprend la région occipito-temporale et la partie inférieure du gyrus temporal qui facilite la combinaison de lettres dans les mots, la représentation directe

des mots familiers visuels et les analyses phonologiques, sémantiques, exigeant cependant une attention contrôlée.



*Figure 2* : Le circuit cérébral de la lecture.

Lorsque nous analysons le développement des capacités cérébrales chez un enfant dyslexique, nous retrouvons des troubles dans différents apprentissages, par rapport aux enfants du même âge sans trouble spécifique. De nombreux chercheurs soutiennent la théorie phonologique comme cause du trouble dyslexique.

*a. La théorie du traitement phonologique.*

Pour beaucoup de chercheurs, la théorie du traitement phonologique serait une des causes au trouble dyslexique, caractérisée par un déficit de la représentation et du traitement de la parole et des sons d'une langue, et donc pénaliserait l'aisance de la lecture. (Annexe 3)

Ce déficit du traitement phonologique vient renforcer le trouble dyslexique, l'origine exacte de ces déficits phonologiques est encore inconnue. Certains évoquent l'hypothèse que ce déficit pourrait s'expliquer par une qualité assez médiocre des représentations phonologiques dans le cerveau, ce qui par la suite explique pourquoi les dyslexiques ont du mal à dissocier des sons proches mais différents.

*i. Les conséquences d'une compensation par l'hémisphère droit.*

La théorie phonologique s'appuie sur l'accès aux représentations phonologiques réalisées par d'autres régions cérébrales n'intervenant normalement pas dans la lecture.

Un dysfonctionnement latéralisé dans un hémisphère peut faciliter la fonction dans l'autre, et un déséquilibre peut conduire à des forces ainsi qu'à des vulnérabilités. Effectivement, une perte des systèmes des lobes temporaux qui interviennent normalement pour inhiber le cortex visuel, a conduit à une sensibilité visuelle

beaucoup plus accrue, l'apparition de souvenirs visuels antérieurs, ainsi que de meilleures créativité artistiques. [4]

Plus les élèves ont une bonne lecture, plus ils sollicitent la région occipitale. Or, les enfants dyslexiques, quant à eux, présentent une hypo-activation des systèmes de lecture de l'hémisphère gauche et compensent en utilisant le gyrus frontal inférieur des deux hémisphères et la zone occipito-temporale de l'hémisphère droit.

Suite à la compensation par l'hémisphère droit, des travaux ont permis de tester la réactivité émotionnelle des personnes dyslexiques. La réactivité émotionnelle a été mesurée chez les enfants, de façon objective avec l'IRM fonctionnelle, et de façon subjective avec la projection de films, mais aussi en interrogeant les parents d'enfants dyslexiques afin d'évaluer le comportement de leur enfant dans la vie quotidienne.

Ainsi, les résultats suggèrent qu'il existe une réactivité émotionnelle plus accrue chez les enfants dyslexiques, visible par un plus grand dynamisme au niveau du comportement facial, de la conductance cutanée, ainsi que de leur fréquence respiratoire.

Ils ont aussi davantage de compétences sociales, mais souffrent d'une anxiété et d'une dépression plus élevée. En revanche, il est important de préciser que les études n'ont été réalisées que pour des sujets atteints de dyslexie phonologique, or il existe de nombreux types de dyslexies, d'autres recherches sont en cours afin de déterminer s'il existe véritablement un lien entre cette réactivité émotionnelle viscéromotrice et les difficultés de lecture. [5]

## ii. Des différences neuro-anatomiques : matière grise, et substance blanche.

Les différences neuro-anatomiques entre les normo-lecteurs et les personnes dyslexiques, pourraient expliquer en partie l'anomalie dans les voies d'analyse des mots, et leurs difficultés à faire correctement la conversion graphème-phonème.

Les résultats de plusieurs dizaines d'études réalisées par l'IRM, montrent que la *matière grise* - lieu de traitement et stockage des informations- est nettement réduite, chez les individus dyslexiques en comparant aux normo-lecteurs, dans les régions temporo-pariétales de la voie dorsale et les régions occipito-temporales de la voie ventrale. Par exemple, le déficit de matière grise dans le gyrus temporal contribue aux difficultés de traitement auditif et de la parole.

De même, des anomalies dans le développement, et dans la plasticité de la *substance blanche* – zone transmettant les informations - ont été retrouvées dans les régions temporo-pariétales gauches et le gyrus frontal inférieur gauche, qui provoquent de mauvaises performances de lecture. [6] [7]

En revanche, dans une étude réalisée par Krafnick et ses collaborateurs, les différences neuro-anatomiques pourraient ne pas être la cause des troubles de la lecture, mais au contraire être les conséquences de ces troubles eux-mêmes. Cela pourrait s'expliquer par les différentes expériences de lecture vécues, entre les



personnes dyslexiques et les personnes non dyslexiques. Il a été démontré que les répercussions de la réduction du volume de la matière grise ne sont pas définitives. En effet, l'apprentissage peut entraîner des changements comportementaux et structurels durables chez les enfants qui ont du mal à apprendre à lire. Cela passe néanmoins par un entraînement important, avec des exercices d'articulation, de syllabes... [8]

Il s'agit alors comme d'un cercle vicieux, plus nous nous entraînons à lire, plus nous aurons des facilités de lecture qui vont s'accompagner d'une augmentation du volume de la matière grise. Si bien que les variabilités de performances retrouvées chez les sujets dyslexiques pourraient expliquer leurs différences neuro-anatomiques. Cependant, l'origine du déficit phonologique fait encore débat.

iii. Une aire spécifique grâce à la plasticité cérébrale.

Des études ont contredit les précédents propos, en étudiant une zone spécifique le « VWFA ».

Elles énoncent que grâce à la plasticité cérébrale, il y a des régions cérébrales qui se réorganisent pour développer une nouvelle spécialisation qui traite spécifiquement les mots écrits. Cette spécialisation s'effectue vers l'âge de neuf ans, et va s'effectuer dans une région appelée « l'aire visuelle des mots », ou « VWFA », située dans le cortex occipito-temporal gauche. Cette aire reçoit des informations provenant du système parvocellulaire ; c'est elle qui va alors intervenir dans la reconnaissance rapide des chaînes de lettres, mais elle est moins activée dans les tâches de lectures chez les personnes dyslexiques, car elle ne donne pas la possibilité de coder l'emplacement précis des caractères. Il s'agirait d'un déficit neuronal lors de l'intégration des lettres et des sons de la parole, probablement en raison d'une spécialisation défailante des systèmes neuronaux.

Ainsi en 2015, Dehaene et ses collaborateurs ont révélé que l'apprentissage de la lecture modifie profondément le traitement visuel précoce, ils en viennent même à parler de « transformation du cerveau ». Par exemple, les personnes alphabètes montrent une plus forte activation occipitale par rapport aux illettrés non seulement pour les lettres mais aussi pour les visages et les images. L'alphabétisation améliore même les réponses rétinotopiques visibles avec l'électrophysiologie dans les zones visuelles primaires, ce qui suggère que le cortex visuel est devenu spécifiquement sensible à l'emplacement où les mots alphabétiques apparaissent sur la rétine, notamment grâce à un renforcement des liens fonctionnels entre les représentations graphèmes et phonèmes. [10]

Certains auteurs ont avancé que l'activation du VWFA défaillant est secondaire à un dysfonctionnement primaire du système de lecture dans la voie dorsale et se produit assez jeune. Mais cette sous-activation a par la suite été démontrée avec des chaînes de chiffres et de symboles dans une tâche sans lecture, il est tentant de conclure que la sous-activation du VWFA est un déficit neuronal primaire qui n'est pas simplement la conséquence d'un manque d'apprentissage ou d'expérience de lecture. [9]

D'autres chercheurs sont quant à eux d'accord avec l'idée qu'un déficit phonologique existe, mais le considèrent comme secondaire à des déficiences provenant des autres sens sensoriels.

## 2. La théorie sensorimotrice.

Selon de nombreux chercheurs, la théorie sensorimotrice serait une cause directe de la dyslexie. Cette théorie s'appuie sur les déficits auditifs et visuels que peuvent présenter les patients.

### a. *Un déficit auditif sous-jacent ?*

Le déficit phonologique peut être attribué à une déficience auditive plus générale, qui a la même origine biologique que la déficience visuelle, à savoir, un dysfonctionnement des voies sensorielles magnocellulaires. Ce dysfonctionnement magnocellulaire est également apparent dans le domaine tactile, et atteint le cervelet via le cortex pariétal postérieur, provoquant d'autres atteintes, notamment dans le domaine moteur. (Annexe 4)

Par conséquent, le trouble dyslexique est ici considéré comme un syndrome sensorimoteur général. [11]

En effet, de nombreuses études ont confirmé la présence de déficits auditifs dans la population dyslexique, grâce à différents tests de discrimination de fréquence et d'intensité, détection de mouvements illusoire et de modulations d'amplitude, perception catégorielle des phonèmes et de la communication analogique. Différentes questions se posent autour de l'étude du traitement auditif des dyslexiques :

- combien de personnes dyslexiques seraient atteintes de déficit auditif ?

Dès le début de ce type de recherche, il a été mis en évidence que seule une partie des dyslexiques (près de 45%) présentait une mauvaise performance dans les tâches auditives. Mais attention, il est possible que ce chiffre soit dû à la faible fiabilité des tests utilisés, avec un faible nombre d'essais par sujet menant à une erreur de mesure élevée et à un chevauchement entre les groupes.

Il est alors pertinent de se demander : chez une personne dyslexique ayant un déficit auditif, celui-ci est-il responsable du trouble de la lecture ?

Les partisans de la *théorie sensorimotrice* ont émis l'hypothèse qu'une perception altérée des sons brefs peut être particulièrement problématique à la perception de la

parole, et compromettrait donc le développement de l'enfant sur ses représentations phonologiques, qui jouent un rôle fondamental dans la fluidité de lecture. Cependant, des études sont venues contrebalancer ce propos, en justifiant qu'il n'y a pas de relation fiable entre la performance sur des tâches de traitement auditif rapide, la catégorisation et la discrimination de la parole. Il n'y a pas non plus de relation fiable entre toute mesure auditive et les mesures pour évaluer les capacités de lecture, même lorsqu'elle est étudiée chez un même patient pendant plusieurs années. Il semble que les dyslexiques présentant les pires déficiences auditives présentent également des troubles de la phonologie et de la lecture, bien que l'inverse ne soit pas nécessairement vrai. [11] [12]

Un fait intéressant est à noter : il y a eu des ébauches selon lesquelles les programmes de formation auditive peuvent améliorer les compétences linguistiques et de lecture des enfants dyslexiques, mais malheureusement, ces études n'ont pu être certifiées car des effets placebo ont semblé influencer les résultats.

Par conséquent, ces troubles auditifs sont limités à un sous-ensemble de la population dyslexique et ont peu d'influence sur le développement de la phonologie et de la lecture. Il semble donc que le déficit phonologique qui est caractéristique de la dyslexie peut survenir en l'absence de tout trouble auditif, mais que les troubles auditifs les plus sévères créant de nombreuses déficiences, agissent comme des facteurs aggravants de la dyslexie.

Il existerait alors comme une intermodalité au trouble dyslexique, qui viendrait expliquer en partie les troubles de lecture. Certaines personnes seraient touchées par un déficit moteur général, d'autres seulement par un déficit auditif, ou encore uniquement par un déficit visuel.

### *b. La théorie visuelle.*

La théorie visuelle dans la dyslexie, dont on entend beaucoup parler, aborde de nombreux volets : autant le traitement visuel en lui-même, que le rôle de l'empan visuel, ou encore la place du stress visuel.

#### *i. Deux grands systèmes au traitement visuel.*

Le traitement visuel est une fonction corticale supérieure. Le décodage et l'interprétation des images rétiniennes se produisent dans le cerveau, après la transmission des signaux visuels par le nerf optique. La lecture implique alors une vision adéquate, et la capacité neurologique d'identifier ce qui est vu. Bien que la vision soit fondamentale pour la lecture, le cerveau doit interpréter les images visuelles entrantes. En effet, le traitement visuo-spatial va permettre d'organiser correctement l'information fovéale grâce aux différents mouvements oculaires, pour une meilleure perception des objets dans l'espace, ou encore pour s'orienter.

Historiquement, de nombreuses théories ont impliqué des défauts du système visuel comme cause de la dyslexie, à ce jour il a été prouvé et certifié que ces théories sont fausses.

L'amélioration de la compréhension a commencé par une série d'études qui ont systématiquement démontré que les déficits des processus visuels, tels que la visualisation, le séquençage visuel, la mémoire visuelle, la perception visuelle et les capacités motrices, n'étaient pas des causes fondamentales des difficultés de lecture.

Certains chercheurs ont attribué une incapacité spécifique à la lecture chez certains patients dyslexiques à un déficit du *système magnocellulaire*. Le système visuel comprend 2 systèmes parallèles : le système magnocellulaire et le *système parvocellulaire*. Le système magnocellulaire répond à des hautes fréquences temporelles et des basses fréquences spatiales pour le mouvement des objets. En effet c'est elle qui donne la capacité de pouvoir bouger ses yeux sur une cible, pour garder son attention. Un dysfonctionnement de la voie magnocellulaire, par la production d'interférences suite aux traitements des stimulations, provoquerait le flou et des distorsions, et par la suite entrainerait la dyslexie. En revanche, les études basées sur la théorie du système magnocellulaire reposent en fait sur la sensibilité aux contrastes. Une étude a alors passé en revue les preuves, et en a conclu qu'il n'y a pas forcément de liens entre la théorie du déficit du système magnocellulaire et la dyslexie. [13]

Le système parvocellulaire est lui plus sensible aux basses fréquences temporelles et aux détails spatiaux fins caractérisés par des hautes fréquences spatiales. Un déficit du système parvocellulaire crée un effet de masquage et provoque un flou de l'acuité visuelle lors de la lecture chez certains enfants dyslexiques. Cependant, ces théories sont encore débattues, certains résultats soutiennent cette théorie, et d'autres la réfutent. [14]

De nos jours, les preuves sont encore insuffisantes pour trouver l'exactitude d'un traitement sur cet éventuel déficit. Cependant, il a été prouvé qu'une complémentarité entre les deux voies est nécessaire pour acquérir une bonne fluidité de lecture. Au cours du développement de la lecture, la voie dorsale va davantage focaliser l'attention aux zones de texte appropriées, fournissant ainsi une rétroaction à la voie ventrale pour permettre des analyses fines des lettres. [15]

Pour témoigner de cette influence d'une voie sur l'autre, des chercheurs ont demandé à des sujets une recherche visuelle grâce aux balayages sériels des lettres, des chiffres et des symboles pour exploiter le flux dorsal impliqué dans le séquençage, le guidage attentionnel et le traitement visuo-spatial. [16]

D'autres ont mis davantage l'accent sur une tâche de lecture implicite avec des pseudo-mots et les fausses polices connues pour exploiter le traitement automatisé des lettres dans le flux ventral. [17]

Donc, en lecture les processus dorsaux destinés pour l'attention, et ventraux pour la reconnaissance ne doivent pas être considérés comme indépendants, mais plutôt comme des fonctions complémentaires. [9]
--

## ii. Lien entre dyslexie, mouvements oculaires et fonction visuelle.

Typiquement chez les sujets dyslexiques, nous retrouvons des mouvements oculaires davantage saccadés et des fixations similaires à ceux d'un lecteur débutant. Les mouvements saccadés semblent être le résultat et non la cause, de leur trouble de lecture. [18]

La durée accrue des fixations et l'augmentation des saccades de régressions, provoquant une lecture plus lente, s'expliquerait par un échec du décodage et de la compréhension, plutôt qu'une anomalie primaire des systèmes de contrôle oculomoteur. Autrement dit, les enfants dyslexiques disent se perdre pendant la lecture, car ils ont du mal à décoder une combinaison de lettres, de mots et/ou à cause d'un manque de compréhension, et non à cause d'une « anomalie de suivi ». Il a alors été démontré que l'amélioration de la lecture modifie les schémas saccadés, à contrario il n'y a encore aucune preuve suggérant qu'un travail uniquement sur les saccades entraîne une meilleure lecture. Néanmoins, il a été étudié que les saccades hypocalibrées chez les personnes dyslexiques, ne présentent pas une probabilité accrue d'accentuer leur dyslexie.

L'insuffisance de convergence peut elle aussi venir interférer la lecture. En effet, le traitement d'une insuffisance de convergence chez une personne dyslexique peut lui permettre de fluidifier sa lecture, la rendre plus confortable mais n'améliore pas directement le décodage ou la compréhension de ce qui est lu.

Des troubles au niveau de la perception visuelle, une erreur de réfraction, un défaut de parallélisme ou un dysfonctionnement binoculaire, ne provoquent pas de dyslexie, mais peuvent en revanche accentuer le trouble de lecture s'il est déjà existant. Preuve à l'appui : de nombreux enfants ayant des troubles de lecture, aiment jouer à des jeux vidéo, y compris des jeux portables, et pendant de longues périodes. Or, jouer sur portables et tablettes, en plus d'avoir besoin de converger, et d'accommoder, nécessite malgré tous des capacités d'attention visuelle, de concentration, et demande une perception visuelle, un traitement visuel adéquat, des mouvements oculaires et une coordination œil-main. Ainsi, si les déficits visuels étaient une des causes majeures des troubles de la lecture, les enfants ayant de tels handicaps rejetteraient catégoriquement, à moyen ou plus long terme ce type d'activité. Cela implique malgré tout un stress visuel, nous reviendrons dessus un peu plus tard.

Lorsque les enfants jouent aux jeux vidéo, leur attention portée à l'environnement qui les entoure est nettement réduite...L'attention est un processus cognitif complexe, aux multiples facettes, avec notamment l'attention visuelle.

## iii. L'empan visuel.

L'*empan visuel* peut se caractériser par l'étendue du champ visuel dans laquelle les lettres peuvent être rapportées. Cela correspond au nombre de lettres retenues lors

d'un bref intervalle de temps d'affichage, comme « la durée d'attention visuelle ». L'étude de l'empan visuel permet de renseigner sur les capacités de l'individu à diviser son attention entre plusieurs cibles simultanées, tout en sachant que l'attention visuelle se développe indépendamment des autres formes d'attention. L'empan visuel peut notamment s'étudier grâce à des tâches de recherches visuelles, où une cible doit être retrouvée parmi un ensemble de distracteurs.

Certains scientifiques reprennent d'abord l'idée qu'au niveau cognitif, la dyslexie est la conséquence d'un déficit phonologique. Cela peut être illustré par des expériences qui ont évalué les compétences phonologiques et la durée d'attention visuelle d'enfants dyslexiques français et britanniques, ainsi que leurs performances de lecture.

Les résultats obtenus ont montré d'abord que les scores du traitement phonologique et de l'attention visuelle étaient deux mesures indépendantes, ce qui peut faire penser que ces compétences exploitent des mécanismes cognitifs dissociés. C'est ainsi que nous nous sommes aperçu que l'empan visuel contribue énormément à l'apprentissage de la lecture, indépendamment de toutes autres compétences phonologiques. Effectivement, une étude a été réalisée auprès de 123 jeunes français et illustre bien que les compétences de traitement de l'empan visuel expliquaient une multitude de variations dans la précision de lecture des mots irréguliers et des pseudo-mots chez les participants dyslexiques. [19]

En revanche, pour la première fois en 2016, une étude a montré que cette durée d'attention visuelle a un impact plus ou moins important dans la dyslexie, si la langue est alphabétique (le français) ou sémitique (l'arabe). Cela s'expliquerait notamment par les contraintes de traitements des mots : pour identifier un mot, les français utilisent une attention visuelle sur l'ensemble des lettres, alors que les lecteurs arabophones utilisent uniquement la racine du mot, ne se focalisant que sur trois ou quatre lettres. La taille de l'empan visuel est alors plus petite pour la langue arabe que pour la langue française, les lecteurs arabophones identifient moins de lettres (3.75 en moyenne) comparés aux français (4.6 en moyenne). [20]

Or, des chercheurs ont voulu aller encore plus loin en se demandant si le déficit non phonologique qu'ils ont identifié chez les sujets dyslexiques est vraiment de nature visuo-attentionnelle, ou reflète uniquement les difficultés de traitement d'une seule lettre ?

Le poids attentionnel est déterminé par l'efficacité sensorielle de base de chaque élément, c'est-à-dire à quel point un élément est traité lorsqu'il est présenté seul, et lorsqu'il est en confrontation avec d'autres éléments. Cela permet de renseigner sur la force avec laquelle un élément est en compétition avec un autre, grâce à un tableau qui présente de nombreuses lettres qui vont entrer en confrontation les unes avec les autres, pour l'accès à la mémoire visuelle à court terme.

Des expériences ont alors été menées, dans lesquelles un signal a été présenté immédiatement dès l'apparition de la succession de lettres afin de s'assurer que la performance ne repose pas sur la mémoire iconique. Ainsi, seul le rapport global devrait être affecté par une dégradation de l'information dans la mémoire iconique.

Contrairement à cette hypothèse, les sujets dyslexiques ont obtenu un niveau similaire sur les deux tâches effectuées et leurs performances sont fortement corrélées, alors le trouble de l'attention visuelle ne provient pas d'une dégradation anormale de la mémoire iconique. [19]

Ils vont ensuite s'intéresser au poids attentionnel, avec la quantité d'éléments visuels pouvant être traités en parallèle dans un tableau multiéléments. Pour évaluer objectivement la durée d'attention visuelle, les organisateurs ont fait clignoter brièvement un tableau de cinq lettres et ont demandé aux participants de signaler soit les cinq lettres, pour établir un rapport global, soit une seule lettre pour le rapport partiel.

Deux expériences ont été menées afin de témoigner de l'influence entre le nombre de lettres rapportées et leur capacité de lecture. La première expérience s'est intéressée aux traitements des 5 lettres entre les enfants dyslexiques et les enfants normo-lecteurs. La seconde expérience ne se concentrait que sur une seule lettre rapportée. Les résultats des deux expériences montrent que les enfants dyslexiques présentent davantage de difficultés à traiter plusieurs lettres à la fois contrairement aux enfants normo-lecteurs. En revanche, les enfants dyslexiques obtiennent des vitesses de lecture similaires aux témoins dans leur taux de traitement des lettres uniques. [19]

En revanche, l'utilisation des lettres pour calculer la durée d'attention a conduit à des critiques selon lesquelles un mauvais rapport peut refléter autant les déficits attentionnels verbaux que visuels. Le débat est toujours en cours, et certains résultats suggèrent que les jeunes dyslexiques montrent une durée d'attention visuelle réduite même quand il s'agit de stimuli entièrement non linguistiques.

Par ailleurs, des études ont montré que l'attention visuelle est altérée non seulement chez les enfants dyslexiques, mais aussi chez les pré-lecteurs ayant un risque familial de dyslexie, et indiquent alors que les troubles attentionnels sont présents avant l'acquisition de la lecture. Grâce à la neuro-imagerie, il a été possible de témoigner que les dyslexiques avec des déficits de l'attention visuo-spatiale et des difficultés de lectures, étaient corrélés à une asymétrie dans la taille fonctionnelle du champ visuel central, dans le cortex visuel primaire (V1) entre les différents hémisphères. Les troubles de l'empan visuel pourraient alors être expliqués par une représentation plus importante du stimulus visuel dans V1 droit que plutôt dans V1 gauche. [21]

À posteriori, l'attention visuelle pourrait être travaillée efficacement pendant la petite enfance, pour ensuite développer des programmes de prévention précoce, nécessitant peu de ressources et susceptibles de réduire considérablement l'incidence des troubles de la lecture, notamment par une stimulation avec les jeux vidéo. [22]

Mais cela reste à nuancer, puisqu'une autre étude a témoigné que les enfants présentant à la fois des déficits phonologiques et visuels n'ont pas montré de handicap de lecture plus sévère que les enfants avec un déficit phonologique pur. Les résultats ont permis de confirmer l'importance des déficits phonologiques dans la dyslexie ; et

suggèrent que la durée d'attention visuelle peut jouer un rôle qui reste néanmoins mineur. [23]

Ainsi, les conclusions des différentes expériences permettent de fournir des preuves qu'indépendamment des déficits phonologiques, un trouble de l'empan visuel contribue aux difficultés de lecture de certains enfants dyslexiques. Ce propos reste toutefois compatible avec l'idée que le développement du système visuel influence la capacité de lecture, et qu'un déficit peut donc ralentir le développement de l'attention visuelle. Cependant, l'argument va dans les deux sens : parce que les compétences phonologiques sont réciproquement influencées par la capacité de lecture, et le trouble initialement induit par un déficit d'attention visuelle va s'aggraver avec un mauvais développement des compétences phonologiques. Par conséquent, il est impossible d'exclure que certains enfants dyslexiques avaient en fait un déficit d'attention visuelle comme cause principale de dyslexie, et un déficit phonologique comme résultat secondaire.

Probablement que seules des données longitudinales permettraient de démêler la causalité des chemins entre les compétences phonologiques, la taille de l'empan visuel, la durée d'attention visuelle et la capacité de lecture.

*c. Une partie liée au stress visuel, plus ou moins corrigée par les filtres colorés.*

Les couleurs jouent un rôle fondamental au sein de la lecture, en particulier en ce qui concerne la discrimination figure-fond, ainsi elles entraîneraient des difficultés supplémentaires chez un patient dyslexique. En effet, cette observation remonte pour la première fois en 1958, lorsque Jansky a rapporté le cas d'un élève ayant un déficit de lecture : il était incapable de reconnaître les mots imprimés sur un papier blanc mais était capable de reconnaître ces mêmes mots sur un papier jaune.

Par la suite, des études ont permis de mettre en évidence que de nombreuses personnes dyslexiques souffrent d'un dysfonctionnement de la perception, appelé « syndrome de sensibilité scotopique », et également connu sous le nom du « syndrome de Meares-Irlen » ou stress visuel. En 2005, un groupe de 32 enfants dyslexiques avec 32 enfants témoins âgés de 7 à 12 ans ont été classés par âge, sexe et milieu socio-économique. Les participants ont été testés sans filtre et avec des filtres dans des tests de lecture. Les deux groupes ont lu plus vite avec la superposition colorée, mais encore plus dans le groupe des dyslexiques. De plus, le stress visuel serait davantage présent dans la dyslexie 37,5 % contre environ 25 % chez les enfants normo-lecteurs. [24]

Les superpositions colorées seraient un remède au stress visuel, et qui amélioreraient par la même occasion la fluidité de la lecture. En revanche, certains réfutent ce propos en estimant que les recherches sur les filtres ne sont pas encore assez concluantes, puisque des preuves contre leur efficacité en tant que traitement ont été fournies. [25]



i. L'usage des filtres colorés améliore la lecture.

Avec « stress visuel », Dr Wilkins Arnold fait référence au stimulus visuel qui est d'origine sensorielle, et non au stress visuel généré par les mouvements des yeux, par l'accommodation et la convergence. Cela affecterait environ 40% d'individus atteints de dyslexie.

Les symptômes souvent évoqués sont le flou (24 %), la duplication (16 %), le saut (12 %), un changement de format (6 %) et une atténuation (3,5 %) du stimulus visuel. Ces symptômes peuvent déclencher par la suite fatigue, nausées, migraines. Ainsi, il s'agirait d'un cercle vicieux où les difficultés engendrées par la dyslexie entraîneraient un stress visuel accru, mais aussi que ce stress visuel viendrait renforcer les difficultés de lecture. [25]

En 1980, l'enseignante Mme Meares avait déjà évoqué certains facteurs au stress visuel : une instabilité de la perception de l'entrée visuelle, induite par le reflet d'une figure par rapport au fond de l'écriture, en l'occurrence ici l'encre noire sur un papier blanc, qui est typique des livres imprimés.

Par la suite, il a été démontré que les symptômes du stress visuel pourraient être diminués en changeant la relation entre les caractéristiques visuelles de l'écriture noire sur fond blanc. Pour se faire, il suffirait de superposer une feuille colorée de plastique transparent sur le texte. Les personnes avec des difficultés de lecture, environ 10 minutes après qu'elles aient lu un paragraphe noir sur un papier blanc, les symptômes apparaissaient, cependant lorsqu'elles lisaient le texte avec la superposition d'un filtre coloré aucun symptôme n'avait été rapporté.

Effectivement, ce phénomène pourrait être expliqué par une forte stimulation sensorielle conduisant à une réduction des mécanismes inhibiteurs dans le cortex visuel. Par la suite, cela entraînerait une excitation excessive des neurones corticaux à l'origine des illusions et des distorsions. Certains individus sont alors touchés par cette sorte d'hypersensibilité de l'œil pour certaines longueurs d'ondes, de sorte que leur cortex visuel réagirait de manière excessive à des stimulations visuelles intenses déclenchant par exemple les migraines.

S'appuyant sur ce terrain, Wilkins et Evans en 2010, viennent expliquer que les superpositions colorées vont permettre de diminuer l'excitation dans certaines zones cérébrales, grâce à une redistribution appropriée. Ces superpositions qui sont censées réduire le stress visuel, pourraient aussi améliorer la lecture, à condition qu'elles soient suffisamment grandes pour couvrir le texte. [26]

Cette idée a été par la suite reprise en 2015 par Kim, Seo et Ha, qui pour eux l'utilisation de filtres semble modifier l'activation des régions corticales intervenants pour la lecture. Ils se sont intéressés à 15 patients souffrants de stress visuel, et ont étudié la lecture de phrases avant et après l'utilisation de lentilles teintées en bleu, et en comparant des clichés réalisés par l'imagerie par résonance magnétique

fonctionnelle (IRMf). L'IRMf a témoigné d'une activation significative dans le cortex temporal supérieur et moyen gauche pour les individus ayant lu avec un filtre. Mais aussi, les résultats ont rapporté que 80% des patients qui ont sélectionné un filtre bleu, ont vu leur vitesse de lecture s'améliorer de plus de 20% après l'avoir utilisé. [27]

ii. Couleurs spécifiques à chaque individu, voire même sans aucune influence.

De nombreuses limites se posent à l'utilisation des filtres colorés.

Une première sur la définition du stress visuel. Effectivement, toutes les études n'ont pas caractérisé le stress visuel de la même manière. Certains auteurs diagnostiquent le stress visuel en fonction de la réponse donnée par les participants qui bénéficient de traitements basés sur des superpositions colorées comme Kriss et Evans, en 2005. Ils avaient relevé que la prévalence du stress visuel chez les individus dyslexiques est 10 % plus élevée par rapport aux individus non dyslexiques : de là les auteurs concluent que la dyslexie et le stress visuel sont deux conditions dissociées mais qui se retrouvent parfois chez un même patient. [25]

D'autres mettent plutôt l'accent sur les symptômes du stress visuel comme des distorsions visuelles de la lecture ; ici le stress visuel est étudié en même temps, dans les tests pour évaluer les compétences en lecture et diagnostic de la dyslexie. Il en est ressorti que pour évaluer l'efficacité de l'utilisation des filtres colorés pour améliorer la lecture, les symptômes doivent être attribuables de manière semblable au syndrome de Meares-Irlen, ce qui n'est pas nécessairement le cas. De plus, l'évaluation des symptômes est basée sur des rapports subjectifs : seuls les étudiants dyslexiques présentant un stress visuel élevé ont montré des gains significatifs en termes de vitesse de lecture en utilisant la couleur qui leur convient le mieux, préalablement déterminée par un colorimètre intuitif. [25]

En effet, les enfants dyslexiques auraient tendance à lire plus vite et leurs fixations prendraient moins de temps uniquement avec un filtre vert, comparé à un filtre jaune ou en l'absence de filtre. En revanche, il est important de souligner que malgré l'utilisation de ce filtre vert, cela n'a aucun impact sur les saccades, et les enfants dyslexiques gardent une vitesse de lecture inférieure à celle des normo-lecteurs. [28]

L'Académie Américaine de Pédiatrie a même rédigé un rapport en 2009 disant qu'aucune preuve solide n'existait sur l'efficacité des superpositions colorées en lecture, l'acquisition de la lecture, ou la dyslexie, et n'ont pas recommandé leur utilisation. [29]

Donc l'existence du syndrome de stress visuel au sein de la dyslexie reste très débattue.

Il est raisonnable de supposer que le stress visuel décourage les personnes dyslexiques à lire, ce qui augmenterait les différences de performances de lecture entre les normo-lecteurs, et les dyslexiques.

Les symptômes typiques de stress visuel pourraient être des symptômes de dyslexie plutôt que des causes, et ainsi l'atténuation de ces symptômes – notamment par

l'utilisation des filtres colorés– pourrait n'avoir aucune conséquence sur la qualité de la lecture.

### **III. Nous aurions enfin trouvé la cause de la dyslexie ? Pas si vrai...**

Une étude réalisée, par deux physiciens-chercheurs français Albert Le Floch et Guy Repars, et parue dans une revue scientifique britannique, en Octobre 2017, a été caractérisée comme étant un pas de géant dans la recherche sur la dyslexie, en démontrant une cause anatomique à la dyslexie ; avec en première responsable la vue. [30]

Ils énoncent que chez tout humain, nous avons des photorécepteurs plus ou moins sensibles à la lumière et aux contrastes, et qui chez les personnes non-dyslexiques sont différents d'un œil à l'autre. Ils estiment qu'un normo-lecteur n'a qu'un œil récepteur préférentiel, et son cerveau mémorise seulement l'image que reçoit cet œil.

Au contraire, ils ont prédit que 90% des dyslexiques n'ont pas d'œil récepteur préférentiel, car ils affichent des tâches de Maxwell parfaitement symétriques.

#### **1. L'étude d'Albert Le Floch et Guy Repars.**

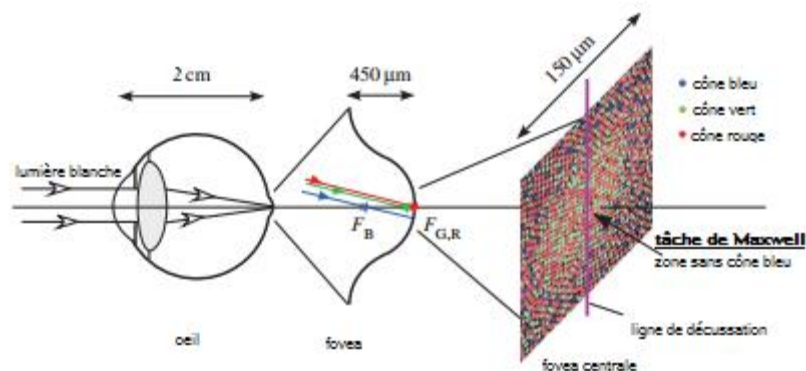
La rétine est un tissu composé de nombreux photorécepteurs notamment les bâtonnets, et les cônes : bleus, rouges et verts. Cependant, leur répartition n'est pas la même sur toute la surface rétinienne. En périphérie, nous retrouvons davantage les bâtonnets, tandis qu'au centre, dans la fovéa nous retrouvons un nombre accru de cônes.

Les chercheurs ont néanmoins rencontrés un problème lorsqu'ils ont voulu étudier la répartition précise des photorécepteurs, grâce à un ordinateur. En effet, bien que les photorécepteurs soient alignés correctement entre eux sur la fovéa, ils ne retrouvent aucune régularité proportionnelle avec l'espacement des pixels d'un écran d'ordinateur.

##### ***a. La répartition des photorécepteurs.***

Notons que les cônes sensibles au bleu ont une distribution spéciale et unique dans la fovéa, ils ne se trouvent qu'en dehors de la fovéa centrale avec une voie anatomiquement spécifique qui transmet leurs propres signaux au cerveau. À contrario, les deux autres types de cônes se retrouvent bien au centre de la fovéa. Les cônes sensibles au bleu présentent une sensibilité spectrale maximale bien séparés (environ 100 nm) de ceux sensibles au vert et rouge. Ainsi, suite à cette différence de répartition et de sensibilité, et pour préserver une acuité visuelle maximale au sein de la fovéa, naturellement notre œil s'est développé en une zone où au centre de celle-ci, sur 100-150 microns de diamètre, il n'y a pas de cônes bleus dans la mosaïque des cônes

rouges et verts. Cela correspond aux tâches de Maxwell alors caractérisé comme étant de minuscules récepteurs rétiniens. (cf. figure 3)



*Figure 3* : Schéma de la dispersion chromatique dans la fovéa centrale.

Pour prouver l'existence de la zone sans cône bleu au centre de chaque fovéa, les chercheurs ont alors utilisé une opsine anti-bleue, mais cette analyse doit être effectuée après autopsie. Cependant, suite à un gonflement des tissus, établir une comparaison du contour d'un cône bleu de l'œil droit et de l'œil gauche pour un sujet donné, avec seulement l'utilisation d'opsine anti-bleue, s'est avéré très compliqué. Ils ont alors eu l'idée d'inventer un nouvel appareil, le fovéascope pour effectuer une analyse quantitative, en comparant les deux centroïdes de la tâche de Maxwell de tout observateur, en se focalisant uniquement sur ceux dont la densité des cônes et la netteté sont les plus significatives.

Ayant pour objectif de vérifier la présence ou l'absence d'asymétrie des tâches de Maxwell et un lien possible entre cette asymétrie et la dominance oculaire, ils ont pris pour témoins un groupe de 30 élèves sans aucun trouble (19 garçons et 11 filles). Puis dans un second temps, ils ont refait la même expérience avec un groupe de 30 élèves dyslexiques (12 garçons et 18 filles), suite à la mise en évidence d'une latéralisation cérébrale plus faible.

Afin de s'assurer de l'existence d'une dominance oculaire chez les sujets, ils ont introduit une nouvelle méthode basée sur des images rémanentes négatives stimulées par le bruit, et « vues » par le cerveau avec les yeux fermés.

#### *b. Détermination de l'œil dominant.*

Pour déterminer ce fameux œil dominant chez l'observateur, différentes méthodes d'observations et sensorielles ont été proposées.

Dans un premier temps, ils ont réalisé le « Bangor Dyslexia Test » et ensuite « le test de la carte perforée ».

Le « Bangor Dyslexia Test » a été inventé par Professeur Miles, et revisité ensuite en 1997. Ce test d'une trentaine de minutes est très utilisé au Royaume-Uni pour dépister

une éventuelle dyslexie chez les enfants à partir de 7 ans ainsi qu'à l'âge adulte. Il est composé de 10 sous-tests qui permettent de déterminer un score final afin de savoir si des examens complémentaires sont nécessaires. Un des avantages de ce test, est qu'il ne se concentre que sur les compétences nécessaires pour le traitement verbal et phonologique, sans mesurer les compétences linguistiques du sujet, de plus une note est attribuée pour le comportement du patient.

Le « Test de la carte perforée », aussi appelé « Test de la feuille percée » est simple et rapide à réaliser, il utilise des repères spatiaux influencés par la latéralité du patient. Il s'effectue à l'aide d'une feuille cartonnée rectangulaire, percée en son centre d'un trou arrondi d'environ 3 cm de diamètre. Le patient bien en face d'un écran de projection situé à 5 m, et à hauteur de son visage tient la feuille cartonnée avec les deux mains. Nous lui demandons de regarder une cible à travers le trou au centre de la feuille. L'œil qui est spontanément choisi pour regarder la cible à travers le trou est qualifié de l'œil dominant. (Annexe 5)

Une bonne fiabilité à travers les deux tests a été retrouvée, mais des artefacts ont été observés comme la distance des observations.

Comme le but est d'éviter tout phénomène perturbant l'expérience, ils ont préféré une méthode d'image rémanente, où les deux yeux restent fermés après avoir fixé en binoculaire un même stimulus lumineux. Une image rémanente peut être symbolisée par exemple par l'apparition d'une tâche sombre lorsque nous fermons les yeux, après avoir fixé un écran blanc lumineux

Ici le principe est qu'avec ses deux yeux, il regarde le point de fixation schématisé par une croix, pendant environ 5 à 15 s selon la luminance, afin d'éviter une trop forte saturation des récepteurs rétiniens ; puis il ferme ses yeux.

L'activité des récepteurs rétiniens est alors enregistrée, la contribution de chaque œil à l'activation de l'image rémanente ne peut être isolée. De plus, comme les réponses des neurones ne sont pas linéaires et présentent une bi-stabilité entre les états de repos et de stimulations, un bruit externe connu est utilisé pour améliorer les réponses de ces signaux non linéaires. Pour les neurones rétiniens, le bruit externe est fourni par la faible lumière diffuse.

En premier lieu, les individus bloquent avec leurs mains la lumière qui pourrait rentrer dans leurs yeux, puis modulent ce bruit en déplaçant alternativement les mains devant chaque œil, avec une périodicité d'environ 2 s. Les chercheurs ont estimé que cela diminue de 2 à 3 % la diffusion lumineuse.

Deux activations de bruit de l'image rémanente sont vues successivement pour chaque œil. Le temps d'évanouissement de ces images rémanentes, est étendu à des dizaines de secondes quand l'observateur continue à déplacer ses mains devant ses paupières. Il est néanmoins important de mentionner, qu'en cas de problème de fusion binoculaire dans la détermination de la dominance de l'image rémanente, une variante de la méthode peut être réalisée, en monoculaire.

Pour les deux cohortes, les résultats de la méthode d'image rémanente ont été comparés avec ceux obtenus par les méthodes d'observation habituelles pour

déterminer la dominance oculaire. Après la détermination de l'œil dominant, ils se sont concentrés sur l'étude des tâches de Maxwell.

*c. Estimation de la taille des tâches de Maxwell.*

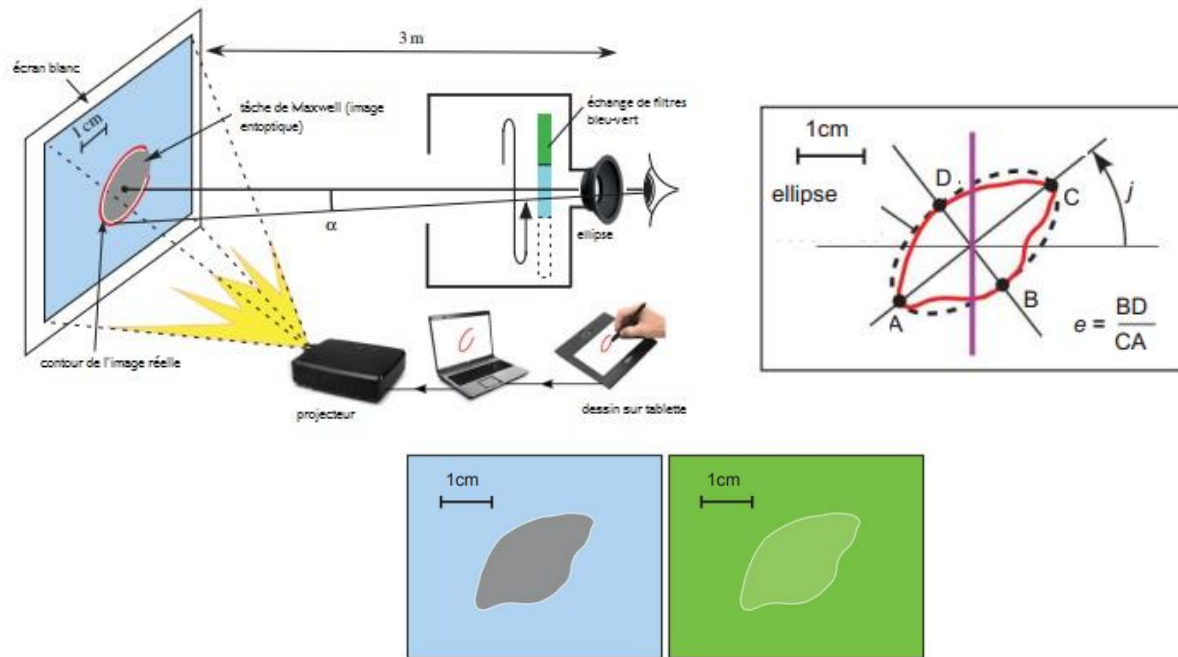
Les tâches de Maxwell sont caractérisées comme un phénomène entoptique, qui généralement ne dure pas plus de 40 ms, en raison du blanchissement des photorécepteurs et de l'adaptation neuronale. Ce sont elles qui permettent d'apercevoir la fameuse image rémanente.

Différents paramètres ont été établis par les deux chercheurs. Pour l'éclairage de l'écran, ils ont utilisé un projecteur avec une luminosité de 3000 lumens. Chaque observateur ajuste ensuite la fréquence de la lumière comprise entre 0,1 et 1 Hz à sa meilleure convenance, en moyenne environ 0,2 Hz.

La taille de la zone de Maxwell a été estimée en demandant au sujet de dessiner sur une tablette, pour chaque œil, le contour autour de l'image entoptique telle qu'il l'a perçue, et qui a été simultanément projetée sur un écran. Autrement dit, cela correspond au contour de la zone sans cône bleu en superposant directement l'image entoptique et l'image réelle projetée sur l'écran. (cf. figure 4)

Le sujet regarde à travers une ellipse, pour quantifier avec précision une éventuelle asymétrie des contours des zones sans cône bleu pour chaque œil. Pour cela, une comparaison est réalisée entre les images entoptiques et des cercles témoins calibrés également projetés sur l'écran, ainsi le diamètre angulaire de la zone bleue sans cône peut être mesuré. (cf. figure 4)

De plus, afin d'augmenter le contraste de l'image entoptique, les chercheurs ont utilisé un filtre bleu-vert. Pour se faire, ils se sont appuyés sur le facteur de transmission, ou transmittance suivant la longueur d'onde des filtres. Rappelons que ce facteur se calcule par le rapport entre l'intensité du rayonnement transmis sur l'intensité incidente. Les deux scientifiques ont utilisé une transmittance, avec des bandes faisant 40 nm de large, centrés à 460 nm pour le bleu et 535 nm pour le vert, est choisie à 16% pour le filtre bleu et 4% pour le filtre vert. Si bien que, lorsque l'observateur regarde un écran blanc brillant à travers le filtre bleu, la zone bleue sans cône est vue comme une zone sombre sur fond bleu, tandis qu'à travers le filtre vert, la zone est perçue en vert plus clair sur fond vert foncé. (cf. figure 4)



*Figure 4* : À gauche, représentation simplifiée du protocole expérimental avec le fovéascope. À droite, calcul d'un contour grâce à la méthode de l'ellipse. En dessous, la perception de l'image à travers le filtre bleu et vert.

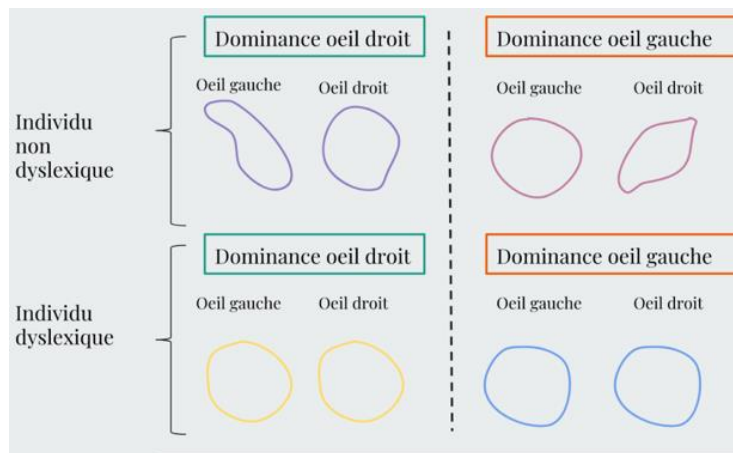
## 2. Les résultats.

La méthode d'image rémanente avec l'utilisation d'un bruit externe, confirme la dominance oculaire de 28 sujets, pour les deux observateurs restants la dominance oculaire n'a pas pu être établie suite à des incidences de regard. 63% des élèves avaient un œil droit dominant, tandis que pour 36 % c'était l'œil gauche. Ces résultats confirment généralement les tests d'observations habituels.

De plus, le test d'image rémanente distingue bien clairement que les connexions neuronales d'une rétine au cerveau sont plus fortes que celles de l'autre rétine. Cela est visible avec une réaction plus courte de l'œil dominant, mais aussi grâce à l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle où l'œil dominant active une zone plus large et un signal du cortex visuel primaire plus élevé que celui de l'œil non dominant.

Cependant, la question fondamentale de l'origine de la dominance oculaire reste à élucider. Pour chercher un lien possible avec une asymétrie potentielle des zones sans cône bleu, ils ont étudié grâce au fovéascope, les contours des centroïdes de Maxwell des trente élèves en bonne santé, indépendamment du test de dominance de l'image rémanente. L'asymétrie entre les deux contours pour chaque observateur est nette et quantifiée par un coefficient d'asymétrie. Pour les observateurs oculaires droitiers, le coefficient d'asymétrie est systématiquement positif, avec une valeur moyenne. Tandis que pour les observateurs oculaires gauches, le coefficient d'asymétrie est quant à lui négatif, avec aussi une valeur moyenne. Toutefois, pour les sujets dyslexiques il y a une absence d'asymétrie, autrement dit les contours sont symétriques pour l'œil droit et l'œil gauche.

L'œil dominant donne une image rémanente beaucoup plus persistante que l'œil non dominant. Les deux français ont remarqué que si l'image est ronde, c'est que l'œil est dominant. L'œil non dominant, au contraire, présente une tâche de Maxwell au contour beaucoup plus irrégulier, de forme elliptique. En outre, toutes les personnes diagnostiquées dyslexiques qui ont participé à leur expérience découvrent qu'elles ont deux tâches de Maxwell rondes, et donc deux yeux dominants. (cf. figure5)



*Figure 5*: Schéma traduisant la dissymétrie des tâches de Maxwell, suivant la dominance oculaire et si l'individu est dyslexique ou non.

Pour les observateurs normaux, la répartition des cônes verts et rouges est différente, ainsi que l'asymétrie des contours des topographies des cônes bleus pour les deux yeux. Par conséquent, les deux images rétiniennes sont donc aussi légèrement différentes. La répartition plus régulière des photorécepteurs sur la fovéa de l'œil dominant suggère une meilleure qualité d'image rétinienne pour cet œil. Par ailleurs, la zone circulaire sans cône bleu de l'image rémanente de l'œil dominant conserve sa propre symétrie. Cela fait référence au fait que l'hémi-décussation chiasmatisque est nécessaire pour les demi-champs nasal et temporal des rétines projetées sur les deux hémisphères pour chaque œil via le corps calleux. Cette hémi-décussation est d'autant plus facilitée pour l'œil dominant. Cette facilité conduit alors à un temps de réaction plus court pour l'œil dominant.

Plus important encore, comme les circuits cérébraux subissent une plasticité cérébrale avec les expériences, au cours du développement des enfants notamment pendant la période critique (zéro-huit ans), l'asymétrie est également renforcée et progressivement transférée au cerveau par la rétinitopie du cortex visuel.

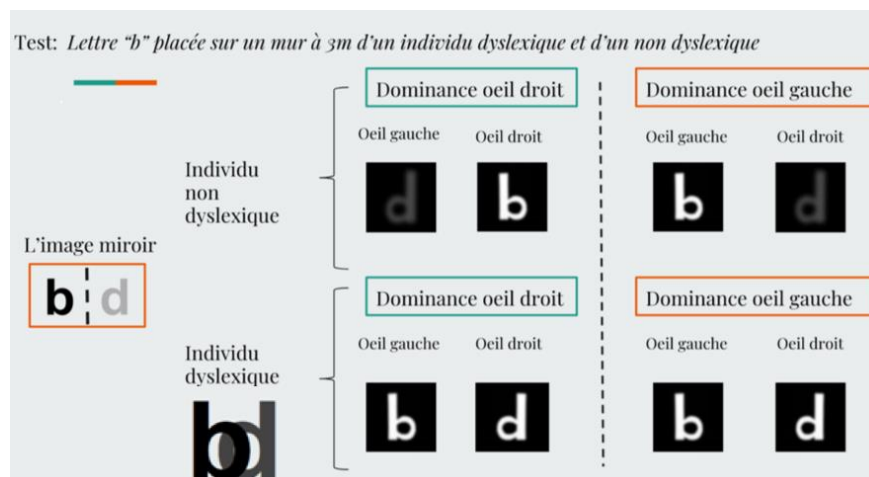
Une étude longitudinale a aussi démontré que l'enjeu de la dominance est également augmenté au cours de cette période, où l'asymétrie contribue aux opérations complexes qui assemblent les circuits neuronaux dans les nombreuses zones du cerveau pour permettre la latéralisation. Mais, il est important de rappeler que ce n'est qu'à la fin de la période de développement, que la dominance oculaire de l'enfant est stabilisée.

À contrario, pour les élèves dyslexiques, aucun des deux yeux ne domine, si bien que leur cerveau doit s'appuyer successivement sur les deux versions légèrement



différentes d'une même scène visuelle. L'absence d'asymétrie perturbe donc la connectivité complexe et la latéralisation des différentes régions du cerveau, qui sont impliquées dans la lecture mais aussi pour les autres tâches cognitives. La connectivité rétinienne, l'organisation, la topographie détaillée du cortex primaire, ainsi que de nombreux faisceaux supérieurs tels que le corps calleux, ou la voie magnocellulaire peuvent être perturbées. Une analyse de connectivité fonctionnelle du cerveau entier de la dyslexie confirme que les dyslexiques présentent une connectivité diminuée le long de la voie visuelle ainsi qu'entre les régions visuelles et préfrontales. Cette faible latéralisation a par la suite été confirmée par l'échographie Doppler transcrânienne.

Concrètement le fait que la « vraie » image et l'image rémanente miroir coexistent, induit une confusion entre la gauche et la droite et la création d'erreurs de miroir dans la lecture. Les images rémanentes montrent que les projections miroirs inter-hémisphériques existent également pour ces observateurs, mais peuvent être légèrement déviées et déformées pour différentes lettres, en particulier, les lettres le long de la ligne verticale, comme le « b » et le « d ». En utilisant la méthode de l'image rémanente avec la lettre « b » comme stimulus, par exemple un lecteur dyslexique voit une superposition de « b » et « d ». Cela engendre un mécanisme de fenêtre temporelle : lorsque le cerveau du dyslexique lit la superposition de « b » et « d », un retard d'environ 5 à 10 ms existe pour l'arrivée d'une image miroir « d » qui a un chemin neuronal supplémentaire. (cf. figure 6)



*Figure 6* : Schéma simplifié du mécanisme de distinction entre le « b » et le « d » et le principe de l'image miroir.

De plus, comme les dyslexiques sont également confrontés à une fixation binoculaire instable, leurs images rémanentes observées peuvent être encore plus complexes, comme par exemple la possibilité de voir un triple « b ».

Pour tous ces observateurs dyslexiques, exploiter le petit retard entre l'image primaire et l'image miroir, permet d'effacer les perturbateurs d'images supplémentaires à des fréquences où aucun scintillement visible ne se produit (c'est-à-dire autour de 70 Hz) et restaure les capacités de lecture. Selon le mécanisme de

Hebbian, ce petit délai suggère la possibilité d'effacer cette image miroir secondaire « d » en renforçant les synapses produisant l'image miroir. Ainsi, les deux physiciens se sont appuyés sur cette théorie, et à mis en évidence à l'aide d'une LED à modulation de largeur d'impulsion, et en profitant du petit retard, qu'effectivement l'image miroir supplémentaire pouvait être supprimé, et facilite ainsi la lecture des personnes dyslexiques.

### 3. Les limites.

Suite à la réalisation de cette étude, les médias se sont empressés de proclamer que, deux physiciens français avaient enfin trouvé LA cause de la dyslexie, et qu'un traitement allait alors être possible. Cependant, de nombreux scientifiques, et spécialistes du trouble de la dyslexie s'y sont intéressés de plus près, et ont su réagir. Effectivement, il en revient souvent une utilisation du fovéascope qui n'est pas forcément appropriée, puisque l'ensemble des autres études réalisées jusqu'à l'heure d'aujourd'hui, se faisaient grâce à la tomographie par cohérence optique autrement dit l'OCT, où des bases de données étaient créées et pouvaient être comparées pour la fiabilité des tests. Ici aucune comparaison n'a pu être envisagée puisque le fovéascope n'avait jamais été utilisé auparavant, il aurait été nécessaire de mettre en parallèle des recherches antérieures et d'aborder les résultats contradictoires.

Par ailleurs, la base des données, autrement dit le choix dans les sujets est elle aussi remise en question. Les deux français ont interrogés soixante étudiants, trente lecteurs sans aucun trouble diagnostiqué, et trente autres dyslexiques. Cette expérience est peu significative puisqu'elle étudie qu'un petit échantillon de personnes. Elle ne rapporte peu de détails sur leurs profils, ils sont seulement décrits comme des individus ayant « des performances de lecture significativement plus faibles que prévu ». Certains scientifiques contestent qu'avant de réaliser l'expérience, une évaluation des compétences de lecture aurait dû être réalisée, afin de certifier que les personnes qui se déclarent comme des lecteurs en difficulté présentent des comportements dyslexiques bien caractéristiques. Par exemple, il aurait été judicieux de leur demander de lire à voix haute des mots et non-mots, de dire quelle était l'orthographe correcte de mots se prononçant de la même manière, ou encore d'étudier leur vitesse et leur précision dans la dénomination de lettres, couleurs..

Pour qu'une étude soit certifiée, il est nécessaire de comparer les témoins par rapport aux sujets ayants le trouble, par exemple suivant l'âge, les antécédents linguistiques, le niveau de QI...

L'explication que font les deux physiciens sur les déficits visuels, est elle aussi remise en cause. Ils les caractérisent comme une anomalie rétinienne, illustrée par un schéma expliquant la distribution d'un type de cellule rétinienne. La rétine contient des cônes courts (S), moyens (M) et longs (L), les étiquettes faisant référence aux longueurs d'onde auxquelles ils sont le plus sensibles. Les auteurs les appellent respectivement les cônes bleus, verts et rouges, or en réalité les cellules ne sont pas spécifiquement adaptées à ces couleurs. Si bien qu'aucune théorie n'explique pourquoi les différences dans la distribution des cellules bleues auraient un impact sur n'importe quel aspect

de la lecture dans des conditions normales. L'absence de cônes bleus dans cette partie de la fovéa est quelque chose de normal, qui est indétectable dans la vraie vie. Si nous avons été dans un laboratoire qui utilise des filtres colorés et des conditions d'éclairage adéquates, la zone étudiée produirait elle aussi une image entoptique.

En outre, la méthode utilisée pour estimer la taille de la zone de Maxwell a elle aussi été remise en question, puisqu'aucune donnée ne nous renseigne sur la précision des observateurs dans la reproduction des images, tout comme la relation entre les images et les propriétés réelles de la rétine. Or, les anomalies retrouvées au niveau de ces tâches, ont ensuite été utilisées pour expliquer pourquoi les dyslexiques perçoivent des lettres telles que « b » et « d » de manière incorrecte, en estimant qu'ils n'ont pas de dominance oculaire, et en ont conclu la cause de la dyslexie. Tout en énonçant ensuite que l'image miroir supplémentaire peut être supprimée simplement en modifiant l'éclairage des stimuli.

Mais en réalité, tout ceci n'est pas juste à 100%... Depuis des années maintenant, de nombreuses études ont montré que la dyslexie est fortement associée à une dominance oculaire atypique, et que les inversions de mots et les mots sautés, que nous pouvons observer chez les lecteurs dyslexiques, sont en fait des déficiences linguistiques plutôt que de troubles visuels ou perceptifs.

Ainsi, pour qu'une cause de la dyslexie puisse être validée, il en conviendrait de démontrer qu'elle permette d'expliquer l'ensemble des symptômes, tout en répondant aux divers profils autant adultes qu'enfants, et ce quel que soit les caractères des langues (alphabétique ou non). Néanmoins, des études ont aussi démontré un rôle crucial des gènes, dans la migration neuronale et le guidage des axones.

#### *a. Une origine génétique associée ?*

La dyslexie a été identifiée comme ayant une forte base génétique : nous estimons à 50 % le risque d'être dyslexique si un des parents présente des troubles, à 75 % si les deux parents sont affectés et de 40 % si un des frères ou sœurs le sont alors que les parents ne présentent pas de trouble. [1]

Des études génétiques ont permis d'identifier de nombreux loci dans lesquels les gènes liés à la dyslexie sont codés : READ1 régulant le gène DCDC2 serait associé à des problèmes de lecture, et le gène KIAA0319 serait lui associé à un développement accru des troubles dyslexiques. Il a été remarqué une très forte interaction entre ces deux gènes chez les personnes dyslexiques, surtout pour les tests de « lecture de mots » et non pour la dyslexie en elle-même. En revanche, l'influence d'un gène plus que l'autre est variable entre différentes langues comme l'Allemand et le Royaume-Uni. Si bien que l'ensemble des caractères de la dyslexie pourrait avoir une origine génétique, mais aussi une origine environnementale en fonction de la langue parlée. [31]

Les neurotransmetteurs jouent aussi un rôle fondamental dans l'ensemble des fonctions corporelles complexes, et notamment dans la lecture. Ils sont synthétisés par de nombreux nutriments tels que la choline par exemple qui va permettre de produire l'acétylcholine, essentielle pour un bon fonctionnement du cerveau, pour l'apprentissage, la mémoire, l'attention...

Cependant, de nombreuses études ont examiné le rôle de la choline dans les difficultés de lecture, visible grâce à des modifications du signal de l'IRM entre des personnes sans aucun trouble spécifique et des dyslexiques, avec une concentration atypique de ce nutriment. Une forte concentration de la choline dans le cortex occipital, le gyrus angulaire, le cortex temporo-pariétal perturbe la mémoire de travail, et va se manifester notamment par une mauvaise lecture, un mauvais décodage, et un amoindrissement de la fluidité de lecture.

En revanche, il n'existe que très peu de données indiquant que l'inhibition de la synthèse d'enzymes qui inhibent la dégradation de l'acétylcholine en choline inactive peut produire une amélioration de la lecture par des mécanismes autres que la simple amélioration de la cognition. Des études commencent à être menées afin de savoir si des médicaments composés de choline peuvent améliorer les difficultés de lecture, en améliorant la mémoire ou d'autres fonctions cognitives chez les patients dyslexiques. [32]

L'ensemble de ces observations ne remettent néanmoins pas en cause l'hypothèse que la dyslexie aurait une origine neuro-développementale.

#### **IV. Des remédiations fiables et durables.**

De nombreux experts pensent que la dyslexie est un trouble qui est basé sur le langage, où des altérations du système visuel peuvent interférer avec le processus d'apprentissage. Les troubles des apprentissages sont difficiles à comprendre, et ont alors engendré une grande variété de traitements alternatifs qui sont controversés et pas toujours prouvés scientifiquement.

En 2017, Livingston et Happé estiment que l'intensité et l'efficacité de la compensation ne se ferait pas suivant le degré de sévérité du trouble dyslexique. Concernant le versant langagier du trouble, elles vont être de l'ordre langagier et neurocognitif, et suivant les répercussions constatées sur la personnalité et la motivation du sujet, un travail de psychologie et psychothérapie peut être envisagé. Néanmoins, une adaptation pédagogique spécifique doit être mise en place, pour adapter la progression de l'enfant. [33]

##### **1. Les nouvelles technologies.**

Étant donné que les personnes dyslexiques ont un trouble de lecture tout au long de la vie, des aménagements et des modifications peuvent être nécessaires en plus de la remédiation ; par exemple cela peut passer par la mise en place d'un tiers temps, des

alternatives aux évaluations, des Plans d'Accompagnements Personnalisés, des ordinateurs, des correcteurs orthographiques...

Mais aussi de nouvelles aides technologiques se développent peu à peu sur le marché avec différents objectifs : soit pour diagnostiquer les personnes dyslexiques, soit pour faciliter leur quotidien, ou encore celles utiles pour la rééducation.

*a. Le Eye-Brain, un outil de diagnostic.*

En premier lieu, un nouveau Eye-Tracker nommé EyeBrain T1, présenté en 2014 lors du Congrès d'Orthoptique, permettrait de diagnostiquer la dyslexie grâce à des mesures quantifiables qui se basent sur les mouvements des yeux et de la tête ; depuis EyeBrain T2 a été développé. [34]

Ce nouveau dispositif repose sur le fait que les dyslexiques présenteraient un trouble dans la coordination binoculaire. Grâce au casque porté par le sujet, il effectue différents tests présentés sur un écran d'ordinateur ; et le gadget donne la possibilité d'étudier la poursuite ainsi que le nombre de saccades progressives et régressives, l'amplitude de ces saccades, et le temps de fixation notamment. Les informations retenues par le casque sont ensuite envoyées sur un logiciel « MeyeVal ». En quinze minutes, en complément du bilan orthoptique, le professionnel peut alors enregistrer et quantifier les données oculomotrices lors de la lecture, pour ensuite les comparer à des normes, et ainsi détecter plus précocement ces troubles. L'utilisation de ce casque est considérée comme un acte dans un bilan orthoptique, l'avantage est de pouvoir étudier les données d'un patient, malgré une mauvaise fixation ou qui ne cesse de bouger. [35]

*b. Les lampes, et lunettes « astucieuses ».*

En s'appuyant sur les études d'Albert Le Floch et Guy Ropars, une lampe stroboscopique LED « Lexilight » a vu le jour. Une lampe qui s'éteint pendant un laps de temps - correspondant au délai d'apparition de l'« image miroir » - et se rallume ensuite 80 fois par minutes. Cela produit donc des flashes à répétition, imperceptibles à l'œil nu, et permettent d'effacer l'image miroir en créant un œil dominant fictif. Suivant l'entreprise « Lexilife », pour un échantillon de 300 personnes dyslexiques, 90 % estiment avoir davantage de facilités, et moins de fatigue après avoir lu. Cette lampe peut s'utiliser autant sur le papier, que pour les écrans. Il est possible de la retrouver chez certains opticiens - assez peu nombreux- ou encore de la commander directement sur leur site pour l'essayer chez soi pendant une centaine de jours, et voir si cela convient. Néanmoins, à l'heure actuelle, elle reste assez onéreuse, aux alentours des 550 euros et n'est pas remboursée par la Sécurité Sociale, ce qui peut créer une limite financière pour les personnes n'ayant pas les moyens. De plus, nous ne savons rien des conditions réalisées pour vérifier la fiabilité de cette lampe. (cf. figure 7) [36] [37]

Les lunettes intelligentes « Lexilens » créées par la Start-Up « Abeye », reposent elles aussi sur l'étude faite par les deux français. Elles permettraient de compenser les troubles de lecture, en agissant sur la fenêtre temporelle, en annulant automatiquement et inconsciemment l'apparition de cette fameuse image miroir. Son principe repose sur une petite batterie et un filtre électronique contenu dans les branches des lunettes. Connectée à une application mobile, cette paire de lunette peut être réglée instantanément à sa propre vue, en jouant sur la transparence des verres, la vitesse de scintillement, le paramètre de contrôle des filtres actifs qu'il faut adapter à la physiologie selon les tests de lecture. Ces paramètres sont ensuite enregistrés pour les prochaines utilisations. (cf. figure 7) [38] [39]



*Figure 7* : Illustration de la lampe « Lexilight » et des lunettes « Lexilens ».

Bien qu'il s'agisse d'un appareil électronique connecté en Bluetooth, ce dispositif est considéré comme « médical non connecté », et donc qui est autorisé dans les examens scolaires. Parmi 200 sujets testés, 90 % d'entre eux affirment avoir une amélioration de fluence et/ou de compréhension.

Cependant, des barrières se posent... Les études réalisées avec ses lunettes interrogent encore, puisqu'un phénomène d'apprentissage et de mémorisation pourrait être retrouvé chez certains enfants dyslexiques. Effectivement, les études montrent un gain significatif de temps de lecture, mais aussi de compréhension globale du texte. En revanche, les recherches se sont déroulées chez des enfants, à qui nous avons demandé de lire d'abord un texte uniquement avec leur paire de correction optique, puis dans un second temps les enfants ont relu le même texte avec les lunettes dites révolutionnaires. Le choix des montures n'est quant à lui pas encore diversifié car il n'existe que deux modèles, à retrouver uniquement chez une enseigne d'opticien particulière : une monture pour les adultes commercialisée depuis Août 2021, et une pour les enfants. Cette monture est assez visible, avec des verres opaques, ce qui peut créer un effet stigmatisant pour ceux qui la portent, rappelons qu'à la base la dyslexie est un trouble qui ne se « voit » pas. Le prix est quant à lui variable entre les enfants (399.00 €) et les adultes (499.00 €), mais suivant le profil du sujet une partie peut être prise en charge par la Sécurité Sociale et la mutuelle complémentaire.

De plus, à l'école, lorsque l'enfant porte ses lunettes électroniques, il doit être placé près d'une fenêtre, pour éviter de créer des clignotements gênants des verres

provoqués par les néons. Ce type d'aide visuelle est aussi contre-indiqué pour les personnes épileptiques.

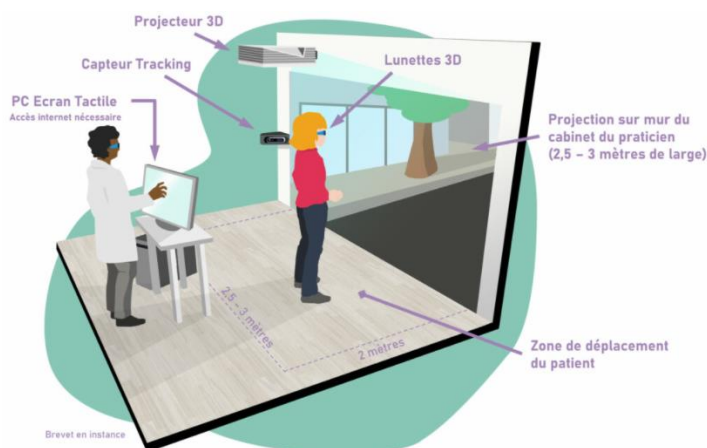
Si bien qu'en Janvier 2021, le ministère français de l'éducation, de la jeunesse et des sports a publié une note, ou plutôt une mise en garde, suite à un rassemblement du conseil scientifique : concernant les études en cours sur la dyslexie considérée comme un problème visuel. À l'heure actuelle, les recherches ont seulement démontré avec certitude que le trouble de la dyslexie est un trouble phonologique.

Si bien, qu'en aucun cas, ce type de compensations (lampes, lunettes) ne doit être proposé à tous les enfants dyslexiques, puisque qu'aucune étude scientifique fiable n'a permis de témoigner de leur efficacité. Le ministère indique que ces compensations ne doivent être recommandées qu'à des enfants qui présentent un trouble rétinien bien diagnostiqué. [40]

### c. Le système MoveR, thérapie immersive de rééducation.

À l'aide d'une entreprise parisienne, Mme Gibert Charlotte orthoptiste spécialisée dans le neuro-développement, vient de déposer un brevet sur un nouveau système « MoveR », concernant la rééducation de la dyslexie, afin de retrouver le plaisir de lire. Celui-ci est basé non plus sur des exercices sur support papier, mais sur des exercices spécifiques qui utilisent la réalité virtuelle, pour permettre de stimuler davantage les aires visuelles complexes des patients, avec notamment un gros travail sur l'attention visuelle. [41]

Concrètement, un mur entier est utilisé comme un écran, avec des lunettes pour la 3D et un capteur de mouvement. (cf. figure 8)



*Figure 8* : Illustration de l'installation du système « MoveR ».

Plusieurs exercices peuvent être proposés à l'enfant, suivant les difficultés retrouvées lors de la lecture. Par exemple, l'enfant est debout, il doit alors lire un texte qui défile sur un paysage déroulant avec des variations dans la vitesse de défilement ou dans le contraste du texte, tout ceci pour ne pas que l'enfant « devine » ou anticipe la lecture, mais bien qu'il lise en temps réel.

D'autres tâches existent : avec des balles virtuelles qui « arrivent sur l'enfant », pour travailler l'orientation du regard corrélé à la coordination de la main. Un autre exercice est davantage utilisé pour les patients avec des troubles de la coordination, qui ont du mal dans la symétrie des lettres, l'enfant va se déplacer pour sauter dans les boucles des "b" ou des "p" de mots qui se rapprochent rapidement, grâce à un travail de proprioception. Il est utile de souligner qu'étant donné que le patient est debout, il ne doit pas présenter un trouble postural car le casque de réalité virtuelle peut engendrer des pertes d'équilibre, ou encore des vertiges, chez certains profils. De plus, les exercices de réalité virtuelle sont aussi déconseillés aux sujets épileptiques, ou ceux souffrants du mal des transports.

Par ailleurs, il est important de rappeler qu'aucune étude scientifique n'a encore été réalisée, pour tester véritablement l'efficacité de ce nouvel appareil.

#### *d. La diversité des applications et jeux interactifs.*

Des applications telles qu'Aidodys, mais aussi des jeux interactifs sur ordinateurs et tablettes fleurissent de jour en jour, récemment des études ont été réalisées, et ont révélé que jouer aux jeux vidéo pourrait améliorer le développement de l'enfant. En effet, les jeux de stratégie permettraient d'améliorer la flexibilité cognitive et les jeux d'action pourraient même aider les enfants dans les apprentissages de la lecture, sans pour autant avoir un entraînement spécifique de la lecture et de l'écriture, mais davantage en améliorant ses capacités attentionnelles. [42] [43]

Ils auraient alors une grande influence notamment sur le système magnocellulaire, ainsi qu'une meilleure sensibilité aux contrastes. Ces deux études spécifient tout de même de ne pas présenter des jeux vidéo violents, et doivent répondre à des paramètres bien spécifiques pour être efficaces, avec un temps maximal d'utilisation de 12 heures réparties sur la semaine.

Des jeux « spécialement » conçus pour les jeunes dyslexiques, sont en cours d'élaboration comme par exemple « Les Six Saisons de Brûme » pour tablette, se basant sur un programme DysApp réfléchi par l'Université de Poitiers, pour améliorer les performances de lecture et l'écriture. Ce jeu n'est pas encore fini, il est testé par les utilisateurs pour transmettre les commentaires afin d'optimiser au maximum ce travail. Toutefois, ces résultats spectaculaires n'ont été obtenus que dans des études évaluant les effets de ce type d'entraînement sur une tâche de décodage, pas sur la compréhension en lecture. [44]

## 2. D'autres techniques.

### *a. Le traitement proprioceptif.*

La lecture ne peut s'automatiser, et être fluide que si les deux yeux localisent bien le mot à lire à un endroit précis, lors de la convergence, appelé « centre de gravité du



mot». Au cours de l'examen clinique des personnes dyslexiques, souvent la localisation spatiale de chaque œil est différente, cela fait référence au Syndrome de Déficience Sensorio-Proprioceptive (SDSP). Cette localisation spatiale est permise par la mise en tension des nombreux muscles dans l'organisme, afin d'obtenir un tonus adapté au maintien d'un équilibre stable quel que soit la posture. Ainsi, cette localisation spatiale différente, pourrait être rendue identique en modifiant les informations proprioceptives, un trouble au niveau de l'une des entrées sensorielles peut interférer avec l'autre et vice-versa.

Il serait possible d'affirmer que la fonction musculaire de la bouche et celle des yeux sont étroitement liées. En effet, cela serait dû à une étroite relation entre les fibres sensibles des trois branches du nerf trijumeau qui se rejoignent dans un ganglion nerveux appelé « Ganglion trigéminal ». Rappelons que le V1 correspond au nerf ophtalmique, le V2 au nerf maxillaire et le V3 au nerf mandibulaire. Il y aurait également des liens directs entre le ganglion trigéminal, et le colliculus supérieur dont ce dernier reçoit des informations impliquées dans le contrôle de la posture, et des mouvements oculomoteurs. (Annexe 6)

Ainsi, dans un groupe de 35 enfants (21 dyslexiques, et 14 normo-lecteurs), il a été démontré qu'il existe une possibilité de modifier la perception visuelle en changeant les informations sensorielles orales. Cette observation serait davantage marquée pour les enfants dyslexiques que pour les enfants normaux-lecteurs, d'autant plus que le phénomène varie selon la posture. Cela pourrait indiquer que les enfants dyslexiques n'ont pas la capacité d'assimiler de multiples entrées sensorimotrices. [45]

D'après les travaux menés par le Dr Quercia, se basant sur des recherches réalisées par des spécialistes de la proprioception, le traitement proprioceptif serait donc d'une grande aide dans le traitement de la dyslexie. Il est nécessaire de préciser que le traitement de la dys-proprioception dans le cadre d'une meilleure prise en charge du trouble dyslexique, se base sur le fait que la dyslexie est un symptôme parmi tant d'autres, fruit d'une maladie sous-jacente. Autrement dit, la thérapie énoncée ne vise à pas à soigner la dyslexie à proprement parler, mais la pathologie qui cause les anomalies de la proprioception : troubles musculaires, troubles temporo-spatiaux, troubles perceptifs et sensoriels... jusqu'à provoquer les symptômes de la dyslexie. [46]

Ce traitement repose sur quatre éléments principaux : le port de semelles orthopédiques ; le port de prismes de faible puissance (maximum 3 dioptries) ; l'action sur la bouche ; l'exécution d'exercices musculaires et le maintien de postures spécifiques dans certaines circonstances.

Beaucoup de personnes ayant essayé cette pratique, estiment que le traitement proprioceptif améliore aussi bien la précision que la vitesse de lecture des enfants dyslexiques, au bout de trois mois en moyenne ; néanmoins cette hypothèse n'a pas donné lieu à des recherches prouvées scientifiquement.

Une autre étude a été conduite par le CHU de Dijon, en collaboration avec l'Unité Inserm « *Motricité Plasticité* » et le centre d'investigation clinique de la Faculté de médecine de Dijon. Ils ont observé effectivement, que les enfants dyslexiques

présentent une posture anormale au quotidien, corrélée à des difficultés pour garder l'équilibre, mises en évidence sur une planche d'équilibre. Soumis à un traitement proprioceptif, les chercheurs ont observé sur les patients dyslexiques de bons résultats pour la lecture de mots réguliers et irréguliers, mais également au niveau des compétences sur les graphèmes. Seules les capacités phonologiques sont restées les mêmes. [47]

Néanmoins, cette étude pose de nombreuses questions, comme l'a précisé un neuropsychologue Mr Robichon en publiant une « Mise au Point ». En notifiant notamment, de la mise en garde d'un possible effet secondaire à ce traitement, avec une aggravation du niveau de lecture chez certains patients. En revanche, le port de prismes redonnerait du confort au patient et s'avère être intéressant en calmant les sujets qui présentent plusieurs troubles associés comme la dyslexie, et l'hyperactivité. [48]

Par ailleurs, en 2016 ; Mr Ramus chercheur au CNRS spécialisé dans la dyslexie a complètement remis en cause les hypothèses de l'efficacité de ce traitement, en évoquant une « méthode fantaisiste ». Il dénonce le fait que les publications faites par Dr Quercia ne permettent pas de conclure que tous les enfants dyslexiques auraient ce Syndrome de Déficience Sensorio-Proprioceptive, puisque les travaux réalisés ne se sont intéressés qu'à de faibles effectifs (33 et 60), et n'ont présenté soit aucun groupe témoin, ou un groupe de témoins dont les données paraissent suspectes. Aucune donnée n'a été renseignée à propos du niveau intellectuel de l'enfant, et si d'autres troubles étaient associés. Selon lui, il est aussi impossible de déduire qu'un déficit proprioceptif joue un rôle particulier dans l'étiologie de la dyslexie, et ni que cette remédiation posturologique améliore la lecture des enfants dyslexiques (ou au moins de ceux qui auraient ce syndrome). [49]

À l'heure actuelle, il est important de souligner que seulement 4 études scientifiques ont été réalisées sur l'évaluation de l'efficacité du traitement proprioceptif de la dyslexie. Cela reste relativement peu pour tirer des conclusions assez fiables, surtout lorsque nous nous rappelons le nombre de personnes touchées par la dyslexie. [50]

<p>Ainsi, tout ce que nous pouvons dire, c'est que les fondements scientifiques de la théorie posturale de la dyslexie restent très incertains. Le traitement proprioceptif est toujours en cours d'évaluation scientifique et il faudra encore de nombreuses années pour arriver à cette validation. Par conséquent, s'il s'agit de faire des recommandations de santé publique, il n'existe donc aucun élément certifié qui permette de recommander aux familles de s'engager dans un tel traitement.</p>
---

#### *b. Les livres, et écritures spécifiques.*

Depuis trois ans, des livres « ZéToolu » ont été conçu pour les sujets dyslexiques, et plus largement pour ceux qui souffrent de difficultés dans l'apprentissage de la lecture. Différents éditions qui permettent de répondre à des niveaux de lecture différents : celles destinées pour les enfants, pour les adolescents et pour les adultes, avec soit un format papier soit un format numérique.

Pour créer de meilleurs repères au sein de la lecture, ces ouvrages montrent une police en gras et colorée pour chaque majuscule, et chaque fin de phrase ; une clarté marquée par des espacements plus grands entre les mots et les lignes. De plus, chaque histoire a été écrite avec une même organisation, pour rendre la lecture plus intéressante. Effectivement, pour faciliter la compréhension et la fluidité de l'histoire, les émotions décrites sont représentées avec des images. Le but est de redonner à l'enfant le plaisir de lire, et les accompagner vers l'autonomie. [51]

Une police « OpenDyslexic » a été développée en 2011, et revisitée en 2013, afin de faciliter la lecture pour les personnes dyslexiques. (cf. figure 9)



This Is an  
example of  
the Open Dyslexic  
Typeface

Figure 9 : Illustration de la police « OpenDyslexic ».

Il s'agit d'une police qui prétend augmenter la lisibilité, en incluant les styles regular, gras, italique, et monospace.

En revanche, une étude de 2016, sur des élèves dyslexiques en primaire, a été menée pour étudier en quoi cette police, aurait affecté un changement sur la vitesse de lecture et/ou la précision. Lors de trois tâches de lecture - la dénomination de lettres, la lecture des mots et la lecture des non-mots - OpenDyslexic a été comparée à deux polices couramment utilisées : Arial et Times New Roman, respectivement sans et avec empattement. Suite à ceci, les sujets ont trouvé que la police était « différente » ou « nouvelle » mais aucune amélioration de la vitesse de lecture, ni même de la précision pour ses élèves n'a été retrouvée. Nous pouvons alors conclure qu'il n'y a pas grand intérêt à utiliser cette police pour rédiger, ou lire des textes. [52]

Selon la Haute Autorité de la Santé française, le seul traitement préconisé pour les enfants dyslexiques reste des séances d'orthophonie. Néanmoins, une prise en charge pluridisciplinaire, va aider l'enfant à se développer plus rapidement.

À l'heure actuelle, il n'existe aucune preuve scientifique suffisante, pour confirmer la théorie selon laquelle des problèmes oculaires ou visuels subtils, notamment un problème d'accommodation, un défaut de parallélisme des axes visuels, un dysfonctionnement visuo-moteur, ou encore des difficultés de perception visuelle ou des difficultés hypothétiques de latéralité, provoquent des troubles d'apprentissage. À part le traitement de l'insuffisance de convergence, les preuves scientifiques ne permettent pas de certifier l'hypothèse selon laquelle le traitement avec les exercices oculomoteurs est un traitement direct ou indirect efficace pour les troubles des apprentissages.

Cependant, l'orthoptiste peut agir sur la rééducation neuro-visuelle, afin de développer ou d'améliorer l'attention, la mémoire visuelle, la représentation dans l'espace, la coordination main-œil et d'acquérir des poursuites et des saccades plus performantes.

Ainsi, il est important de rappeler que l'ensemble des outils mis en place ne permettront pas de guérir le trouble, mais chercheront à le compenser de façon la plus adéquate possible, suivant le profil de l'enfant.

## **Conclusion :**

La dyslexie est une histoire ancienne, mais qui reste toujours d'actualité.

L'enfant dyslexique a des difficultés à développer ses compétences en lecture exigibles autant pour sa réussite scolaire, que pour son avenir professionnel. Bien qu'elle évolue, la dyslexie persiste tout au long de la vie, malgré les différents suivis thérapeutiques. C'est ainsi qu'il est pertinent de se questionner sur les dernières avancées scientifiques à propos de ce trouble, pour ensuite faciliter le quotidien des patients.

Cette altération découle de multiples causes sous-jacentes dont la gravité est variable, produisant comme un spectre dyslexique, avec des profils très hétérogènes. La plupart des recherches qui ont été réalisées au cours de ces trente dernières années se sont beaucoup attardées sur l'importance de la dimension phonologique dans le cas des apprentissages chez des individus sans aucun déficit, et l'implication de cette dimension phonologique chez les personnes dyslexiques.

Or peu à peu, de multiples arguments ont témoigné en faveur d'une atteinte du système sensori-moteur. Effectivement, les troubles auditifs, visuels, ceux de l'empan visuel, ainsi que le stress visuel contribueraient au trouble dyslexique. Il existe maintenant un énorme corpus de preuves qui témoignent que les profils dyslexiques présentent des particularités dans le traitement visuel, mais qui ne concernent pas la fonction visuelle dans sa globalité. Cependant, les récentes investigations suggèrent qu'une altération dans le système magnocellulaire pourrait se manifester uniquement quand la tâche fait appel à un traitement attentionnel bien spécifique. La complexité réside sur l'hypothèse qu'un déficit de la voie magnocellulaire ainsi qu'un trouble visuo-attentionnel, sont le plus souvent rencontrés chez les sujets ayants des troubles phonologiques.

De plus, récemment et pour la première fois, une étude française dit avoir trouvé la cause de la dyslexie. Elle a mis en évidence que les sujets dyslexiques présentent des tâches de Maxwell parfaitement symétriques avec deux yeux dominants, ce qui expliquerait la fenêtre temporelle et les confusions de lettres. Très vite, des limites ont été révélées, et cette cause n'a pas pu être validée.

Néanmoins, il a été certifié que des différences neuro-anatomiques sont retrouvées entre un patient dyslexique et un normo-lecteur, et que des compensations cérébrales sont mises en places, avec une part génétique associée. Les dernières avancées scientifiques ont alors permis d'élucider de nombreux points, et d'élaborer de nouveaux moyens de diagnostic, de rééducation et de compensation afin de faciliter le quotidien des personnes dyslexiques. Toutefois, leur efficacité reste débattue, le seul traitement recommandé reste une prise en charge pluridisciplinaire.

Les chercheurs découvrent encore à l'heure actuelle, des faits fondamentaux sur la structure, le fonctionnement, et le rôle du système visuel, sans parler du langage et du

reste du cerveau. C'est ainsi que des travaux à grande échelle et sur de longues années vont devoir encore être nécessaires, avec comme principal objectif de comprendre comment les conditions sous-jacentes interviennent et interagissent pour produire ce trouble, plutôt qu'essayer de trouver une cause unique.

## **Bibliographie :**

[1] Habib M. Dyslexie et troubles apparentés: une nouvelle thématique de santé publique, entre neuroscience et pédagogie. Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine. juin 2015;199(6):853 68

[2] Dyslexie : formes, diagnostic et traitement de la dyslexie [Internet]. [Consulté le 13 oct 2021]. Disponible sur : <https://orthophonie.ooreka.fr/comprendre/dyslexie>

[3] Convert, C., 2018 Mars 28. Les effets de la lecture sur le cerveau. [Internet] [Consulté le 26 Sept 2021]. Disponible sur : <https://www.envoludia.org/entraide/effets-de-lecture-cerveau/>

[4] Miller, B. L., Ponton, M., Benson, D. F., Cummings, J., & Mena, I. (1996) Enhanced artistic creativity with temporal lobe degeneration. *The Lancet*, 348 (9043), 1744-1745.

[5] Sturm VE, Roy ARK, Datta S, Wang C, Sible IJ, Holley SR, et al. Enhanced visceromotor emotional reactivity in dyslexia and its relation to salience network connectivity. *Cortex*. Janv 2021;134:278 95.

[6] Sihvonen, A. J., Virtala, P., Thiede, A., Laasonen, M., & Kujala, T. (2021). Structural white matter connectometry of reading and dyslexia. *NeuroImage*, 241, 118411.

[7] Fournernet, P., da Fonseca, D., da Fonseca, D., & Martinet, C. (2018). Apport de la neuro-imagerie aux troubles des apprentissages [E-book]. Dans *Les enfants Dys* (p. 37-45). Elsevier Masson.

[8] Krafnick, A. J., Flowers, D. L., Napoliello, E. M., & Eden, G. F. (2011). Gray matter volume changes following reading intervention in dyslexic children. *NeuroImage*, 57(3), 733 741.

[9] Boros M, Anton J-L, Pech-Georgel C, Grainger J, Szwed M, Ziegler JC. Orthographic processing deficits in developmental dyslexia: Beyond the ventral visual stream. *NeuroImage*. 1 mars 2016;128:316 27.

- [10] Dehaene, S., Cohen, L., Morais, J., & Kolinsky, R. (2015). Illiterate to literate: behavioural and cerebral changes induced by reading acquisition. *Nature Reviews Neuroscience*, 16(4), 234-244.
- [11] Ramus, F. Developmental dyslexia: specific phonological deficit or general sensorimotor dysfunction? *Curr Opin Neurobiol.* 2003;13(2):212-8.
- [12] White, S., Milne, E., Rosen, S., Hansen, P., Swettenham, J., Frith, U., & Ramus, F. (2006). The role of sensorimotor impairments in dyslexia: a multiple case study of dyslexic children. *Developmental Science*, 9(3), 237-255.
- [13] Skottun, B. C. (2000). The magnocellular deficit theory of dyslexia: the evidence from contrast sensitivity. *Vision Research*, 40(1), 111-127.
- [14] Amitay, S. (2002). Disabled readers suffer from visual and auditory impairments but not from a specific magnocellular deficit. *Brain*, 125(10), 2272-2285.
- [15] Ciavarelli, A., Contemori, G., Battaglini, L., Barollo, M., & Casco, C. (2021). Dyslexia and the magnocellular-parvocellular coactivation hypothesis. *Vision Research*, 179, 64-74.
- [16] Vidyasagar, T. R., & Pammer, K. (2010). Dyslexia: a deficit in visuo-spatial attention, not in phonological processing. *Trends in Cognitive Sciences*, 14(2), 57-63.
- [17] Vinckier, F., Qiao, E., Pallier, C., Dehaene, S., & Cohen, L. (2011). The impact of letter spacing on reading: A test of the bigram coding hypothesis. *Journal of Vision*, 11(6), 8.
- [18] Franzen, L., Stark, Z., & Johnson, A. P. (2021). Individuals with dyslexia use a different visual sampling strategy to read text. *Scientific Reports*, 11(1).
- [19] Bosse, M. L., Tainturier, M. J., & Valdois, S. (2007). Developmental dyslexia: The visual attention span deficit hypothesis. *Cognition*, 104(2), 198-230.



- [20] Faris Haroon Rasheed Awadh. Caractérisation et rôle de l'empan visuo-attentionnel chez les lecteurs arabophones adultes et enfants (experts et dyslexiques développementales). *Psychologie*. Université Grenoble Alpes, 2016. Français
- [21] Nguyen, B. N., et al (2021). Visual search efficiency and functional visual cortical size in children with and without dyslexia. *Neuropsychologia*, 155, 107819.
- [22] Jakubowska N, Dobrowolski P, Rutkowska N, Skorko M, Myśliwiec M, Michalak J, et al. The role of individual differences in attentional blink phenomenon and real-time-strategy game proficiency. *Heliyon*. avr 2021;7(4):e06724.
- [23] Saksida A, Iannuzzi S, Bogliotti C, Chaix Y, Démonet J-F, Bricout L, et al. Phonological skills, visual attention span, and visual stress in developmental dyslexia. *Developmental Psychology*. oct 2016;52(10):1503 16.
- [24] Kriss, I., & Evans, B. J. (2005). The relationship between dyslexia and Meares-Irlen Syndrome. *Journal of Research in Reading*, 28(3), 350-364.
- [25] Uccula, A., Enna, M., & Mulatti, C. (2014). Colors, colored overlays, and reading skills. *Frontiers in Psychology*, 5.
- [26] Wilkins, A. J., & Evans, B. J. (2010). Visual stress, its treatment with spectral filters, and its relationship to visually induced motion sickness. *Applied Ergonomics*, 41(4), 509-515.
- [27] Kim JH, Seo H-J, Ha S-G, Kim S-H. Functional magnetic resonance imaging findings in Meares-Irlen syndrome: a pilot study. *Korean J Ophthalmol*. avr 2015;29(2):121 5.
- [28] Razuk, M., Perrin-Fievez, F., Gerard, C. L., Peyre, H., Barela, J. A., & Bucci, M. P. (2018). Effect of colored filters on reading capabilities in dyslexic children. *Research in Developmental Disabilities*, 83, 1-7.
- [29] American Academy of Pediatrics. Learning Disabilities, Dyslexia, and Vision. *Pediatrics*. 1 août 2009;124(2):837 44.

[30] Le Floch A, Ropars G. Left-right asymmetry of the Maxwell spot centroids in adults without and with dyslexia. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 25 oct 2017;284(1865):20171380.

[31] Ludwig, K. U., et al. (2008). Investigation of interaction between DCDC2 and KIAA0319 in a large German dyslexia sample. *Journal of Neural Transmission*, 115(11), 1587-1589.

[32] Rahul DR, Ponniah RJ. The Modularity of Dyslexia. *Pediatrics & Neonatology*. mai 2021;62(3):240-8.

[33] Colé P, Sprenger-Charolles L. Chapitre 7. Nouvelles perspectives : les stratégies compensatoires dans la dyslexie. In: *La dyslexie : de l'enfant à l'adulte*. Paris: Dunod; 2021. p. 221-41. (Éducation Sup). [Internet]. [Consulté le 26 Sept 2021] Disponible sur : <https://www.cairn.info/la-dyslexie-de-l-enfant-a-l-adulte--9782100809318-p-221.html>

[34] EyeBrain aide les orthoptistes à diagnostiquer la dyslexie PRVF. 2014 [Internet]. [Consulté le 29 Août 2021]. Disponible sur : <http://prvf.fr/eyebrian-aide-les-orthoptistes-a-diagnostiquer-la-dyslexie/>

[35] Products e(ye) BRAIN - A suricog branch. [Internet]. [Consulté le 26 Sept 2021]. Disponible sur : <https://www.eyebrian.fr/index.php/products/>

[36] Lexilife [Internet]. [Consulté le 29 Août 2021]. Disponible sur : <https://lexilife.com/fr/22-14-lampe-lexilight.html>

[37] Nizon, M. (2020, 31 octobre). La pensée magique amplifiée par le CES au service d'une lampe stroboscopique pour les dyslexiques. [Internet]. [Consulté le 22 janv 2022]. Disponible sur : <https://www.michelnizon.com/la-pensee-magique-amplifiee-par-le-ces-au-service-dune-lampe-stroboscopique-pour-les-dyslexiques/>

[38] De la découverte scientifique sur la dyslexie aux lunettes Lexilens — Lexilens [Internet]. [Consulté le 26 Sept 2021]. Disponible sur : <https://www.lexilens.me/blog/lexilens-decouverte-scientifique>

[39] Comment Atol et la start-up Abeye ont développé des lunettes connectées pour les enfants dyslexiques [Internet]. [Consulté le 10 Août 2021]. Disponible sur : <https://www.usine-digitale.fr/article/comment-atol-et-la-start-up-abeye-ont-developpe-des-lunettes-connectees-pour-les-enfants-dyslexiques.N1054859>

[40] Conseil Scientifique De L'Education Nationale. (2021, 1 janvier). Les lampes et Lunettes conçues pour les enfants dyslexiques : que dit la recherche ? [Communiqué de presse]. Disponible sur : [https://www.reseau-canope.fr/fileadmin/user\\_upload/Projets/conseil\\_scientifique\\_education\\_nationale/Note\\_CSEN\\_2021\\_01.pdf](https://www.reseau-canope.fr/fileadmin/user_upload/Projets/conseil_scientifique_education_nationale/Note_CSEN_2021_01.pdf)

[41] Rouen. Contre les troubles DYS, une orthoptiste utilise la réalité virtuelle [Internet]. [Consulté le 27 Août 2021]. Disponible sur: <https://www.tendanceouest.com/actualite-386659-rouen-contre-les-troubles-dys-une-orthoptiste-utilise-la-realite-virtuelle?fbclid=IwAR2urUo-b5b7-trgyMWPO7VOSj7GK7j7H3FmcpIbO-B5es5nD5qTnW56eXo>

[42] Glass BD, Maddox WT, Love BC. Real-Time Strategy Game Training: Emergence of a Cognitive Flexibility Trait. Wenderoth N, éditeur. PLoS ONE. 7 août 2013;8(8):e70350.

[43] Franceschini S, Gori S, Ruffino M, Viola S, Molteni M, Facoetti A. Action Video Games Make Dyslexic Children Read Better. Current Biology. 18 mars 2013;23(6):462 6.

[44] Brûme : un jeu vidéo au service de la lecture et de l'écriture. Université de Poitiers. [Internet]. [Consulté le 29 Août 2021]. Disponible sur: <https://www.univ-poitiers.fr/brume-un-jeu-video-au-service-de-la-lecture-et-de-lecriture/>

[45] Mettey A, Bouvier A-M, Jooste V, Boucher Y, Quercia P. Are changes in the stomatognathic system able to modify the eye balance in dyslexia? Journal of Oral Biology and Craniofacial Research. avr 2019;9(2):166 71.

[46] Vieira S, Quercia P, Michel C, Pozzo T, Bonnetblanc F. Cognitive demands impair postural control in developmental dyslexia: A negative effect that can be compensated. Neuroscience Letters. 22 sept 2009;462(2):125 9.

[47] *Posturologie*. SNOF. [Internet]. [Consulté le 22 Janv 2022] Disponible sur : <https://www.snof.org/public/expliquer/posturologie>

[48] Posturologie et dyslexie : une mise au point s'impose... Fabrice [Internet]. [Consulté le 1 Sept 2021]. Disponible sur : <https://studylibfr.com/doc/2207886/posturologie-et-dyslexie---une-mise-au-point-s-impose...->

[49] Le point sur l'approche posturologique pour la dyslexie. Ramus méninges. 2016 [Internet]. [Consulté le 31 Août 2021]. Disponible sur : <https://scilogs.fr/ramus-meninges/le-point-sur-lapproche-posturologique-pour-la-dyslexie/>

[50] Inserm. Gueguen J, Hassler C, Falissard B, Evaluation de l'efficacité du traitement proprioceptif de la dyslexie. Juillet 2016. Disponible sur : <https://www.inserm.fr/wcontent/uploads/2017-11/inserm-rapportthematique-efficacitetraitementproprioceptifdyslexie-2016.pdf>

[51] Zétoolu ZTL Editions jeunesse. ZTL Éditions. [Internet]. [Consulté le 26 Sept 2021]. Disponible sur : <http://www.ztl-editions.fr/>

[52] Wery JJ, Diliberto JA. The effect of a specialized dyslexia font, OpenDyslexic, on reading rate and accuracy. *Ann of Dyslexia*. juill 2017;67(2):114-27.

## **Lexique :**

Communication analogique : communication non verbale, avec la proprioception, les gestes, les mimes, la posture, et le système visuel.

Empattement : ligne ajoutée à chaque extrémité des caractères (sans empattement : « TRADUIRE » et avec empattement « TRADUIRE »)

Gyrus : circonvolutions cérébrales aux nombreux replis.

Image entoptique – phénomènes entoptiques : effets visuels dont la source est dans l'œil lui-même, ils peuvent être expliqués par des phénomènes physiologiques connus, comme les myodésopsies. Ils sont à différencier des illusions optiques, qui pour ces dernières sont des effets de perception, suite à une interprétation faite par le cerveau, sans cause connue. C'est une image produite par les cellules rétiniennes plutôt que par une image externe.

Image rémanente : illusion optique qui continue à apparaître après que l'exposition d'une image originale ait cessé. Cela engendre une persistance rétinienne.

Loci : pluriel de locus, endroit physique et précis sur un chromosome qui est invariable. Il est alors possible de lui attribuer des coordonnées afin de le situer.

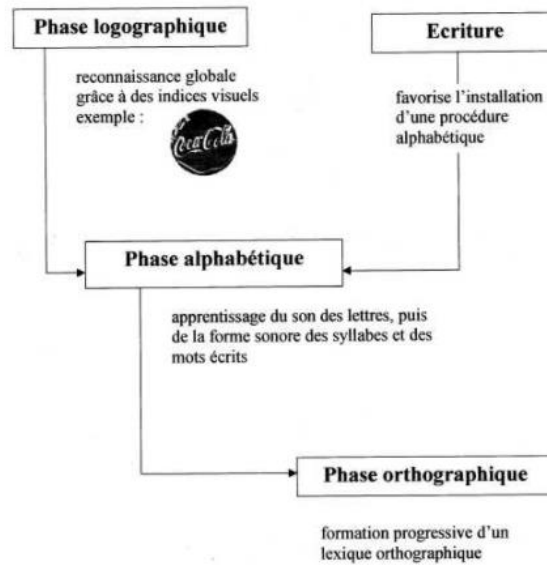
Lumen : intensité lumineuse d'une ampoule, c'est-à-dire la quantité de lumière qu'elle génère. Le nombre de Lumens se calcule à partir de Lux.

Mémoire iconique : c'est un sous-système propre à la mémoire visuelle, très utilisée pour l'encodage. Elle nous donne la capacité d'enregistrer une quantité importante d'informations, durant un laps de temps très court. Elle permet l'intégration temporelle des stimuli, autrement dit elle donne la capacité à voir une scène au cinéma de manière fluide, alors qu'il s'agit d'un regroupement d'images statiques qui se succèdent rapidement ; ainsi que l'intégration spatiale, donnant la possibilité de lire malgré les mouvements constants de nos yeux.

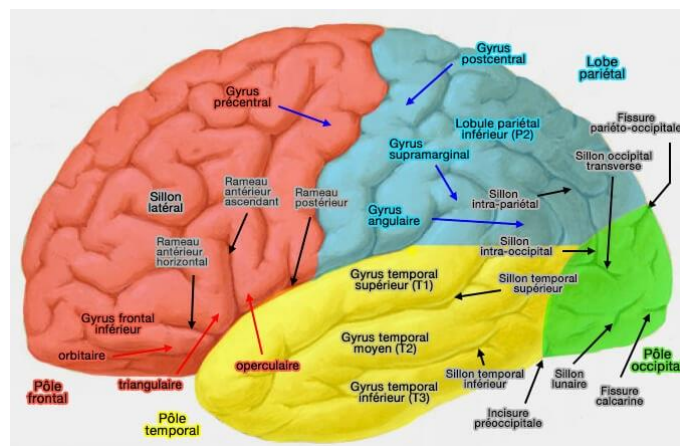
Réponses rétinotopiques : organisation spatiale particulière et précise des réponses des neurones visuels suite à des stimuli visuels. Cela permet de dresser une représentation schématique du champ visuel, avec une amplification maculaire, autrement dit la zone fovéolaire occupe une place prépondérante comparée aux zones périphériques.

## Annexes :

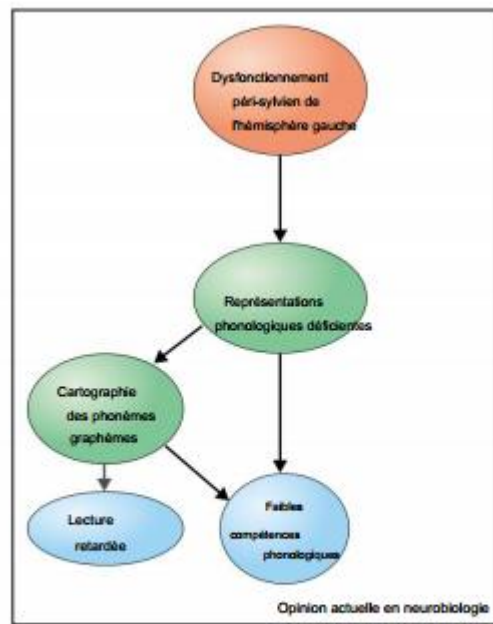
### 1. Les trois stades de la lecture, selon le modèle de Frith.



### 2. Schéma simplifié des différents gyrus du cerveau.

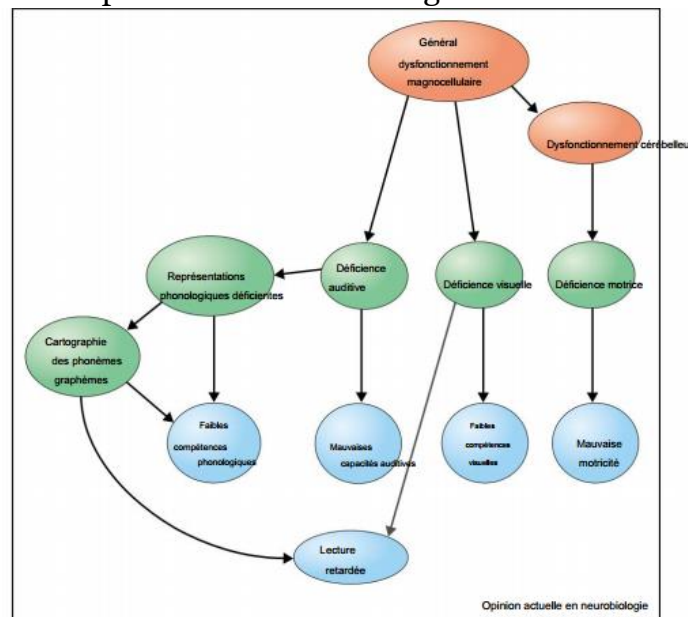


### 3. Représentation simplifiée de la théorie phonologique dans la dyslexie.



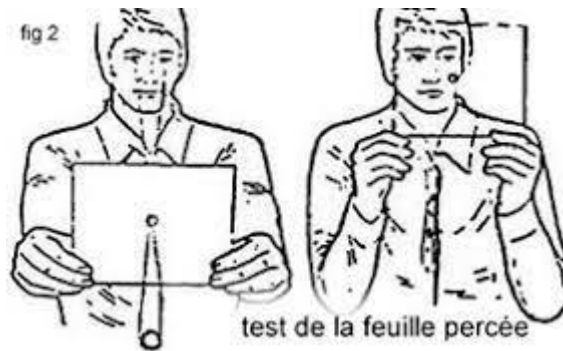
La théorie phonologique de la dyslexie. Un déficit phonologique spécifique d'origine péri-sylvienne gauche est postulé comme étant la cause directe des troubles de la lecture. Les bulles représentent les déficiences aux niveaux neurologique (rouge), cognitif (vert) et comportemental (bleu); les flèches représentent les liens de causalité.

### 4. Représentation simplifiée de la théorie magnocellulaire dans la dyslexie.

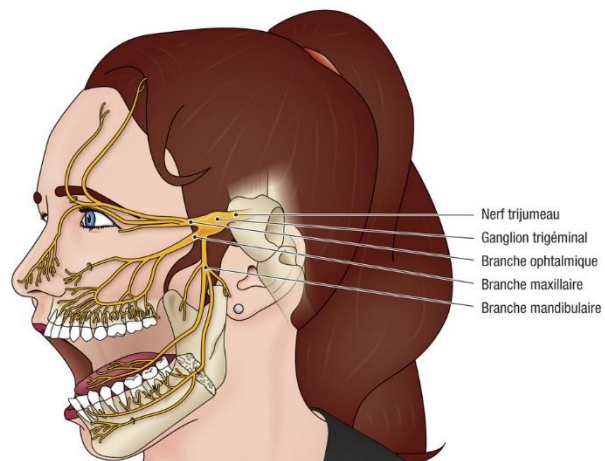


La théorie magnocellulaire générale de la dyslexie . Un dysfonctionnement magnocellulaire général est supposé engendrer des déficits auditifs, visuels et cérébelleux/moteurs. Le déficit auditif provoque à son tour un déficit phonologique, déclenchant ainsi la même cascade d'événements que celle prédite dans la théorie phonologique. Le déficit visuel magnocellulaire est considéré comme une autre cause directe des problèmes de lecture. Dans la théorie cérébelleuse on pense également que la déficience cérébelleuse/motrice contribue indépendamment aux problèmes phonologiques et de lecture (non représentés ici).

5. Représentation simplifiée du « Test de la carte perforée », ou « Test de la feuille percée ».



6. Représentation simplifiée des ramifications du nerf trijumeau.

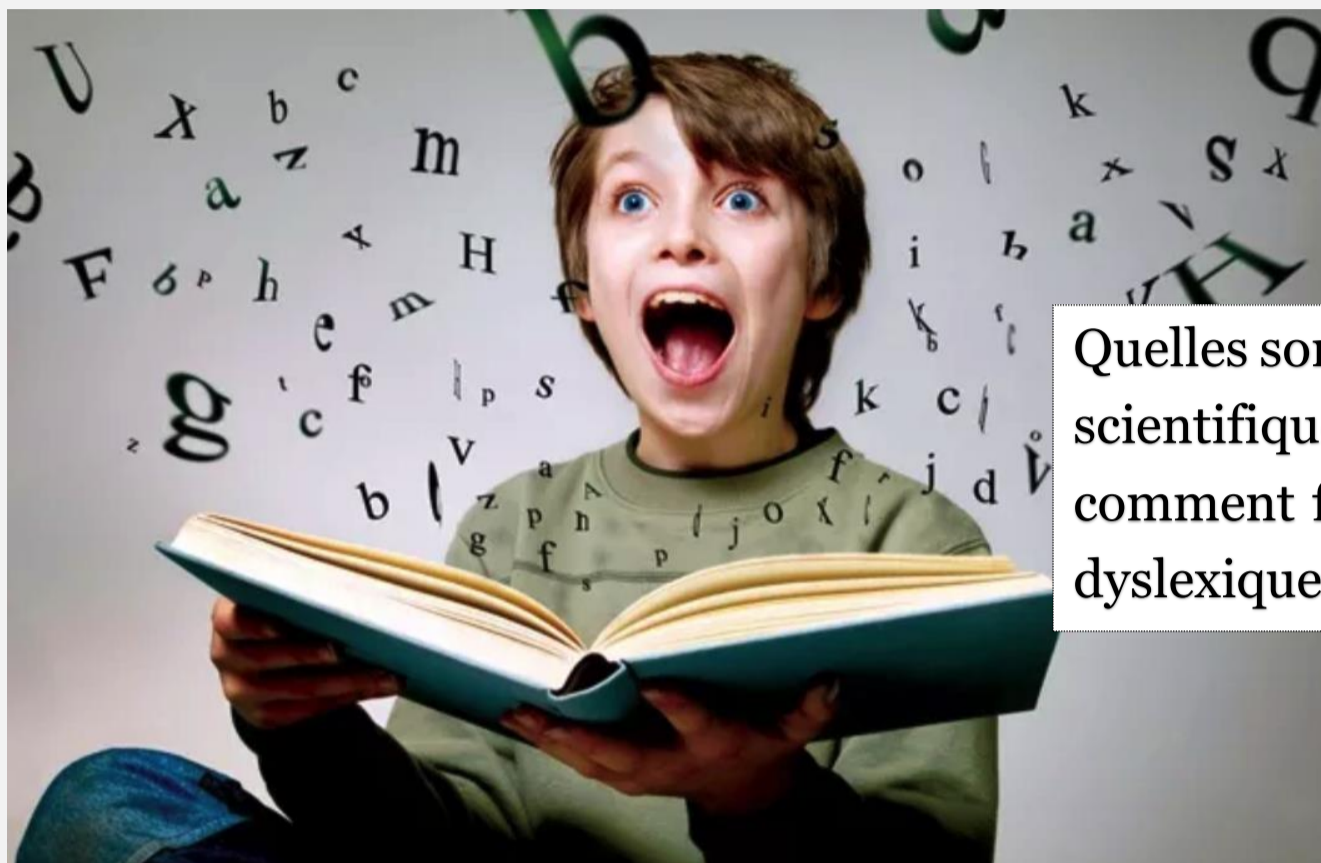




**Article :**

# LES DERNIERES DECOUVERTES SUR LA DYSLEXIE

BOUSQUET Océane – Mémoire de fin d'études Année 2021-2022



Quelles sont les dernières avancées scientifiques sur la dyslexie, comment faciliter le quotidien des dyslexiques ?

## RESUME

La dyslexie est un des troubles des apprentissages les plus étudiés, et se rapporte à des difficultés persistantes de la lecture, malgré un entraînement accru. L'acquisition de la lecture étant un processus complexe, la dyslexie peut alors se manifester de différentes façons. Aujourd'hui, nous en savons beaucoup sur ce trouble, mais pas encore suffisamment. En effet, les scientifiques ont évoqué de multiples théories tentant d'expliquer son origine, ou plutôt ses origines, car la dyslexie aurait des causes multifactorielles.

Grâce aux progrès de la science, de nombreuses études continuent d'être effectuées, et donnent lieu à de nouvelles découvertes. Malgré les compensations qui existent, un des principaux objectifs pour les années à venir, reste de trouver un ou des traitements adéquats, durables, et prouvés scientifiquement pour faciliter le quotidien des sujets qui en souffrent.

## ABSTRACT

Dyslexia, is one of the most studied learning disorders, and relates to persistent reading difficulties reading, despite increased training. As the acquisition of reading is a complex process, dyslexia can manifest itself in different ways. Today, we know a lot about this pathology, but not enough yet. Indeed, scientist have evoked multiple theories that attempt to explain its origin, or rather its origins, because dyslexia would have multifactorial causes.

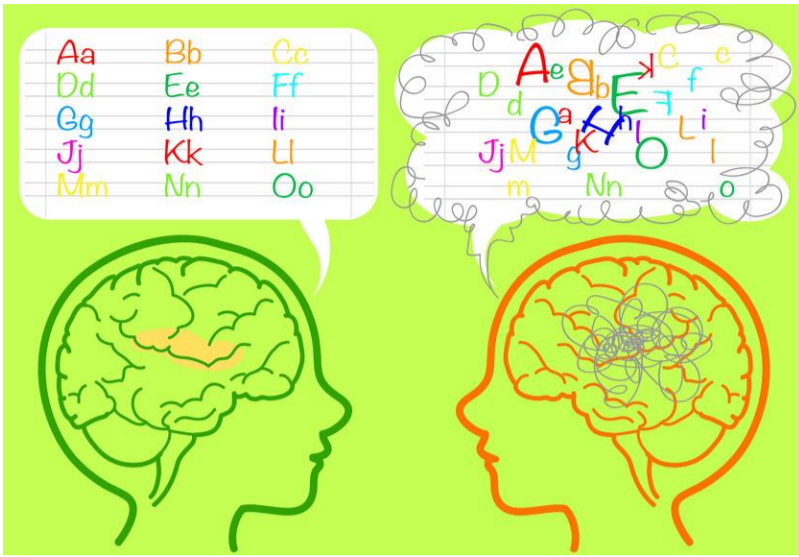
Thanks to advances in science, many studies continue to be carried out, and give rise to new discoveries. Despite the compensations that exist, one of the main objectives for the coming years, is to find one or more adequate, sustainable, and scientifically proven treatments to facilitate the daily life of subjects who suffer from it.

## Mots clés

Avenir – Causes – Dyslexie – Recherches – Prévalence – Théories – Traitements

## Key Words

Dyslexia – Future – Prevalence – Reasons – Researches – Theories – Treatments



## Qu'est-ce que la dyslexie ?

La dyslexie est un des troubles « dys », se caractérisant par une perturbation dans la mise en place des apprentissages dans un domaine spécifique. Elle renvoie à un trouble spécifique du langage écrit, plus précisément à un trouble spécifique de la lecture.

Mal pris en charge, ce trouble vient perturber sérieusement la vie scolaire et même la vie quotidienne des sujets. Il est alors indispensable que les enfants soient pris en charge le plus tôt possible, par une équipe pluridisciplinaire, dans laquelle intervient notamment l'orthoptiste.

### Qui ?

La dyslexie survient chez un enfant d'intelligence normale, sans aucun déficit intellectuel ou sensoriel, et scolarisé normalement. Elle ne résulte ni d'un manque de volonté d'apprendre ni d'un contexte familial défaillant. C'est un trouble des apprentissages qui doit être distingués de la « simple » difficulté. En effet, les troubles des apprentissages s'installent durablement dans le temps, se manifestent différemment au cours de la vie, ainsi ils ne pourront pas être remédiés, mais seulement compensés par diverses méthodes, suivant le profil de l'individu.

### Différentes formes

Diagnostiquer un individu comme étant dyslexique n'est pas simple, de nombreux éléments sont à prendre en considération ; le DSM-5 a alors établi différents critères pour aider les professionnels. [1]

Différents types de dyslexies existent : la *dyslexie phonologique*, concrètement en lecture l'enfant éprouve de grandes difficultés pour automatiser les conversions graphèmes-phonèmes, pour déchiffrer les nouveaux mots et a tendance à davantage les deviner.

La *dyslexie de surface* fait elle référence à un trouble visuo-attentionnel, qui se manifeste par une incapacité à automatiser la lecture à partir de la forme visuelle des mots. L'enfant a des confusions sur les mots qui se ressemblent phonétiquement par exemple « belle et balle », il va éprouver des difficultés à épeler certains mots car son orthographe reste phonétique « éléphant » va être épelé « éléfan ».

La *dyslexie mixte* est la plus handicapante. Le lexique interne de l'enfant est souvent très faible ce qui donne une lecture très laborieuse, et souvent incomprise. À terme, cela peut entraîner une alexie.

## INTRODUCTION

La première fois que le trouble dyslexique a été découvert remonte au début des années 1900 par des médecins anglais, dont Dr Pringle MORGAN qui est le premier à le nommer. Depuis, de nombreuses recherches ont été réalisées. L'étude de la dyslexie est en constante évolution, de ce fait, il n'existe pas qu'une seule définition, elles sont nombreuses mais se rejoignent sur un point commun : une origine neurologique avec un fonctionnement atypique du cerveau.

En ce qui concerne la prévalence du trouble, Mr Habib et Mr Giraud rappellent qu'elle varie suivant les critères diagnostiques, les méthodes d'évaluation ainsi que les facteurs socioculturels et économiques.

Aujourd'hui, en France, 5 à 8 % de jeunes ayant dix ans environ seraient touchés, et la dyslexie représenterait entre 8 et 12 % de la population mondiale. Néanmoins, la prédominance de la dyslexie est influencée par la complexité phonémique d'une langue.

### L'apprentissage de la lecture

La lecture demande l'acquisition de multiples facteurs liés à l'expérience, aux capacités et au fonctionnement neurologique d'une personne. Ainsi, différentes compétences sont sollicitées pour lire : des compétences langagières, mnésiques avec la mémoire de travail, sémantiques sur la pertinence de la prononciation de certains mots, attentionnelles et exécutives en faisant appel aux stratégies de regard. Ces dernières prennent quatre à cinq ans pour se mettre en place, et s'automatisent au cours du primaire.

Apprendre à lire se fait en différents stades d'après le modèle de Frith. (cf. figure 1)

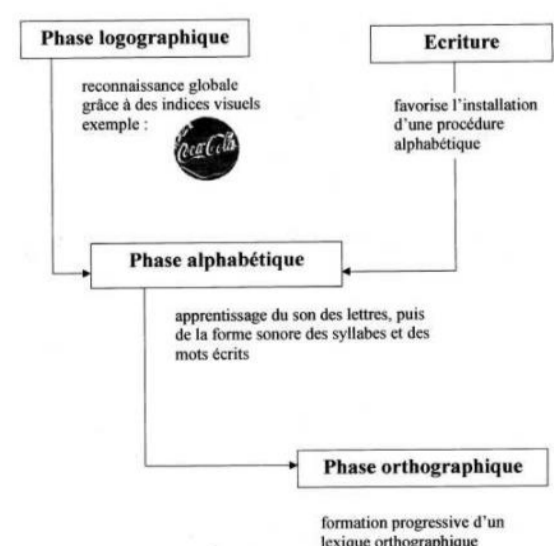


Figure 1: Les trois stades de la lecture, selon le modèle de Frith.



La recherche des causes de la dyslexie constitue un des objectifs des travaux scientifiques. Les recherches sont souvent réalisées en comparant des personnes dyslexiques aux normo-lecteurs. Cela peut se faire avec différents types d'études : génétiques, épidémiologiques, électro-physiologiques, par autopsie, par imagerie médicale, ou en se focalisant sur les mouvements oculaires.

## L'évolution des découvertes, une intermodalité des théories :

Pendant près de 20 ans, la théorie dite « phonologique » a prédominé avec en cause un dysfonctionnement cérébelleux. Mais progressivement, de plus en plus d'études ont émergé et fournissent des preuves sur une théorie plus « sensorimotrice », liée à des déficits auditifs et visuels.



### La théorie phonologique

Pour beaucoup de chercheurs, la théorie du traitement phonologique serait une des causes au trouble dyslexique, qui pourrait s'expliquer par des différences anatomiques et fonctionnelles dans le cerveau.

- Une *hypo-activation des systèmes de lecture* de l'hémisphère gauche avec une compensation par le gyrus frontal inférieur des deux hémisphères et la zone occipito-temporale de l'hémisphère droit. Suite à la compensation par l'hémisphère droit, les dyslexiques présentent une réactivité émotionnelle plus accrue, davantage de compétences sociales, mais souffrent d'une anxiété et d'une dépression plus élevée. [2]

- Un volume amoindri au niveau de *la substance blanche et de la substance grise* du cerveau.

Ces différences pourraient ne pas être la cause des troubles de la lecture, mais au contraire être les conséquences de ces troubles eux-mêmes. Cela pourrait venir des différentes expériences de lecture, entre les personnes dyslexiques et normo-lecteurs. Les répercussions de la réduction du volume de la matière grise ne sont néanmoins pas définitives, et pourraient être réduites grâce à un important travail d'articulation. [3]

- Une *sous activation de l'aire visuelle* des mots appelée la « région VWFA » dans le cortex occipito-temporal gauche. C'est elle qui va notamment intervenir dans la reconnaissance rapide des chaînes de lettres. Mais cette défaillance proviendrait d'un déficit neuronal primaire, qui ne serait pas simplement la conséquence d'un manque d'apprentissage ou d'expérience de lecture. [4]

### La théorie sensorimotrice

Cette théorie s'appuie sur un dysfonctionnement des voies sensorielles magnocellulaires.

Différentes hypothèses ont été énoncées :



- Une première sur la *perception altérée des sons brefs* qui peut être particulièrement problématique à la perception de la parole, et compromettrait donc le développement de l'enfant sur ses représentations phonologiques.

Des études récentes sont venues contrebalancer ce propos, en justifiant qu'il n'y a pas de relation fiable entre la performance sur des tâches de traitement auditif rapide, la catégorisation et la discrimination de la parole. Il n'y a pas non plus de relation fiable entre toute mesure auditive et les mesures pour évaluer les capacités de lecture, même lorsqu'elle est étudiée chez un même patient pendant plusieurs années. Les troubles auditifs sembleraient alors être limités à un sous-ensemble de la population dyslexique, si bien que le déficit phonologique qui est caractéristique de la dyslexie peut survenir en l'absence de tout trouble auditif, mais que les troubles auditifs les plus sévères créant de nombreuses déficiences, agissent comme des facteurs aggravants de la dyslexie. [5] [6]

- La théorie visuelle, elle aborde de nombreux volets : le traitement visuel, l'empan visuel, ou encore la place du stress visuel.

Il a été prouvé que les processus dorsaux destinés pour l'attention, et ventraux pour la reconnaissance ne doivent pas être considérés comme indépendants, mais plutôt comme des fonctions complémentaires. [4]



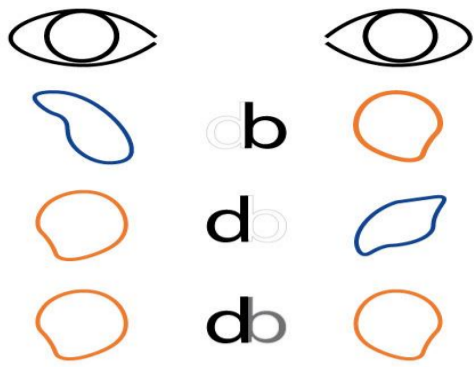
Historiquement, de nombreuses théories ont impliqué des défauts du système visuel comme cause de la dyslexie, à ce jour il a été prouvé et certifié que ces théories sont fausses. Des troubles de la perception visuelle, une erreur de réfraction, une insuffisance de convergence, un défaut de parallélisme ou un dysfonctionnement binoculaire, ne sont pas des causes fondamentales des difficultés de lecture mais peuvent venir accentuer le trouble s'il est déjà existant.

Toutefois, les sujets dyslexiques présentent des mouvements oculaires beaucoup plus saccadés, et des fixations similaires à ceux d'un lecteur débutant. Les mouvements saccadés semblent être le résultat et non la cause, de leur trouble de lecture. [7]

- Indépendamment des déficits phonologiques, un trouble de *l'empan visuel* contribue aux difficultés de lecture de certains enfants dyslexiques. Il a été démontré que ce trouble était souvent corrélé à une asymétrie du champ visuel central, dans le cortex visuel primaire. [8] En revanche, il est encore impossible de prouver que certains enfants dyslexiques avaient en fait un déficit d'attention visuelle comme cause principale de dyslexie, et un déficit phonologique comme résultat secondaire. Probablement que seules des données longitudinales permettraient de démêler la causalité des chemins entre les compétences phonologiques, les caractéristiques de l'empan visuel et la capacité de lecture.

- Le « *syndrome de stress visuel* » aussi appelé le « Syndrome de Meares-Irlen » peut se caractériser par un flou, une duplication, un saut, un changement de format, ou/et une atténuation du stimulus visuel. La place que ce syndrome occupe dans la dyslexie est très débattue encore actuellement. En effet, les difficultés engendrées par la dyslexie entraîneraient un stress visuel accru, mais aussi ce stress visuel viendrait renforcer les difficultés de lecture. Ainsi, de nombreux auteurs concluent que la dyslexie et le stress visuel sont deux conditions dissociées mais qui se retrouvent parfois chez un même patient.

L'utilisation de filtres colorés pour atténuer les symptômes semble être adaptée uniquement dans des conditions bien spécifiques. [9]



Une étude réalisée, en Octobre 2017 par deux physiciens-chercheurs français Albert Le Floch et Guy Repars, a été caractérisée comme étant un pas de géant dans la recherche sur la dyslexie, en démontrant une cause anatomique à la dyslexie ; avec en première responsable la vue. [10]

## Nous aurions enfin trouvé la cause de la dyslexie ? Pas si vrai...

### L'étude

Un groupe témoin de 30 élèves ne présentant aucun trouble a été comparé à 30 élèves dyslexiques, suite à la mise en évidence d'une latéralisation cérébrale plus faible.

Les 2 physiciens énoncent que chez tout humain, les photorécepteurs sont plus ou moins sensibles à la lumière et aux contrastes, et que chez les normo-lecteurs sont différentes d'un œil à l'autre. De ce fait, ils ont prédit que 90% des dyslexiques n'ont pas d'œil récepteur préférentiel, avec pour origine la symétrie des tâches de Maxwell.

Ces tâches sont un phénomène entoptique, qui généralement ne dure pas plus de 40 ms, en raison du blanchissement des photorécepteurs et de l'adaptation neuronale. Elles détiennent un pigment incapable de rendre compte du scotome bleu fovéal ; ils ont alors utilisé une *opsine anti-bleue* qui a confirmé ce propos, mais cette analyse doit être effectuée après autopsie. Cela s'est avéré trop complexe, c'est ainsi qu'ils ont inventé le *fovéascope* pour effectuer une analyse quantitative, en comparant les deux centroïdes de la tâche de Maxwell.

Ils commencent par objectiver la *dominance oculaire*, en introduisant une nouvelle méthode basée sur des images rémanentes stimulées par un bruit externe connu, et « vues » par le cerveau avec les yeux fermés.

Le principe est qu'avec ses deux yeux, le sujet regarde une croix, pendant environ 5 à 15 s selon la luminance, afin d'éviter une trop forte saturation des récepteurs rétiniens ; puis il ferme ses yeux. En premier lieu, les individus bloquent avec leurs mains la lumière qui pourrait rentrer dans leurs yeux, puis modulent ce bruit en déplaçant alternativement les mains devant chaque œil, avec une périodicité d'environ 2 s. Les chercheurs ont estimé que cela diminue de 2 à 3 % la diffusion lumineuse.

Par la suite, la *taille des tâches* a été estimée en demandant au sujet de dessiner sur une tablette, pour chaque œil, le contour autour de l'image entoptique telle qu'il l'a perçoit, et qui a été simultanément projetée sur un écran. Ils introduisent une ellipse, et un filtre bleu-vert pour augmenter le contraste de l'image entoptique. (cf. figure 2)

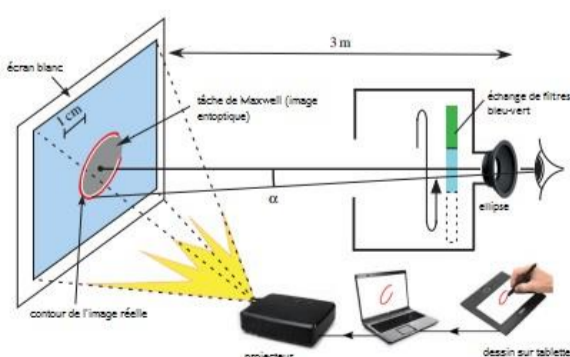


Figure 2 : Représentation simplifiée du protocole expérimental, avec le fovéascope.

### Les résultats

Concernant la méthode d'image rémanente, elle démontre la dominance oculaire de 28 sujets, grâce à une image beaucoup plus persistante, les deux observateurs restants n'ont pas de dominance oculaire suite à des incidences de regard. 63% des élèves avaient un œil droit dominant, tandis que pour 36 % c'était l'œil gauche.

De plus, les deux français ont remarqué que si l'image est ronde, c'est que l'œil est dominant. L'œil non dominant, au contraire, a une tâche de Maxwell avec un contour beaucoup plus irrégulier, de forme elliptique. Or toutes les personnes diagnostiquées dyslexiques qui ont participé aux expériences, révèlent qu'elles ont deux tâches de Maxwell rondes, et donc deux yeux dominants. Cela expliquerait les *confusions* entre la gauche et la droite et la création d'erreurs de miroir dans la lecture.

Les images rémanentes montrent que les projections miroirs inter-hémisphériques existent également pour ces observateurs, mais peuvent être légèrement déviées et déformées pour différentes lettres, en particulier, les lettres le long de la ligne verticale, comme le « b » et le « d ».

En utilisant la méthode de l'image rémanente avec la lettre « b » comme stimulus, par exemple un lecteur dyslexique voit une *superposition de « b » et « d »*. Cela engendre un mécanisme de *fenêtre temporelle* : lorsque le cerveau du dyslexique lit la superposition de « b » et « d », un retard d'environ 5 à 10 ms existe pour l'arrivée d'une image miroir « d » qui a un chemin neuronal supplémentaire. (cf. figure 3)

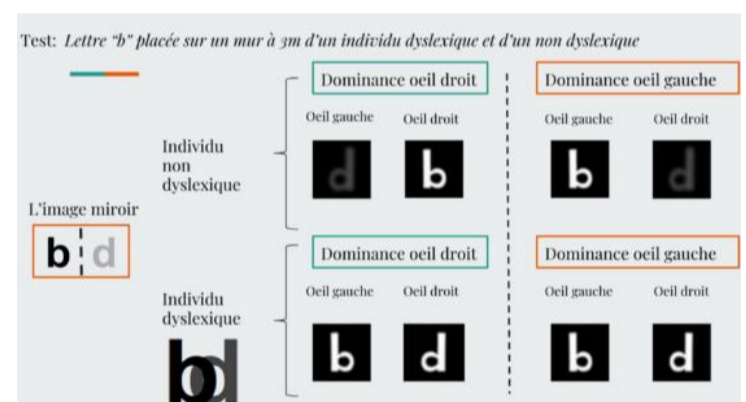


Figure 3 : Schéma simplifié du mécanisme de distinction entre le « b » et le « d » et le principe de l'image miroir.

### Discussion

Suite à la réalisation de cette étude, les médias se sont empressés de proclamer que, les deux physiciens français avaient enfin trouvé LA cause de la dyslexie, et qu'un traitement allait alors être possible. Cependant, de nombreux scientifiques s'y sont intéressés de plus près, et ont su réagir sur différents points, et témoignent des limites : l'utilisation du fovéascope, le choix dans les sujets, l'estimation de la taille des tâches de Maxwell. Ainsi, pour qu'une cause de la dyslexie puisse être validée, il en conviendrait de démontrer qu'elle permette d'expliquer l'ensemble des symptômes, tout en répondant aux divers profils, et ce quel que soit les caractères des langues, ce qui n'est pas le cas ici.



## Des remédiations fiables et durables.

### *Les nouvelles technologies*

De nouvelles aides technologiques se développent peu à peu sur le marché avec différents objectifs : pour diagnostiquer les personnes dyslexiques, pour faciliter leur quotidien, et celles utilisées pour la rééducation.

- *Le Eyebrian T2* permettrait de diagnostiquer la dyslexie grâce à des mesures quantifiables qui se basent sur les mouvements des yeux et de la tête. [12]

En quinze minutes, en complément du bilan orthoptique, le professionnel peut alors enregistrer et quantifier les données oculomotrices lors de la lecture, pour ensuite les comparer à des normes, et ainsi détecter plus précocement ces troubles. L'utilisation de ce casque est considérée comme un acte dans un bilan orthoptique, l'avantage est de pouvoir étudier les données d'un patient, malgré une mauvaise fixation ou qui ne cesse de bouger. [13]

- *Les lampes « Lexilight », et lunettes intelligentes « Lexilens ».* Commercialisées depuis peu, elles ont été développées en s'appuyant sur les études d'Albert Le Floch et Guy Ropars. (cf. figure 4)

Elles permettraient de compenser les troubles de lecture, en agissant sur la fenêtre temporelle, en annulant automatiquement et inconsciemment l'apparition de cette fameuse image miroir. Néanmoins, l'utilisation de ces nouveaux gadgets pose certaines limites, si bien que début 2021, suite à un rassemblement du conseil scientifique, le ministère français de l'éducation, de la jeunesse et des sports a publié une mise en garde en énonçant que ce type de compensations ne doit être proposé aux enfants dyslexiques, étant donné qu'aucune étude scientifique fiable n'a permis de témoigner de leur efficacité. [14]



Figure 4 : Représentations de la lampe « Lexilight », et lunette « Lexilens ».

- Concernant la rééducation de la dyslexie, un brevet a été déposé sur un nouveau système « MoveR », afin de retrouver le plaisir de lire. Concrètement, un mur entier est utilisé comme un écran, avec des lunettes pour la 3D et un capteur de mouvement. Différents jeux de réalité virtuelle sont ensuite proposés, pour stimuler les aires visuelles complexes des patients dyslexiques, avec notamment un gros travail sur l'attention visuelle. [15]

Cependant, aucune étude ne démontre l'efficacité de ce système. [16]

- Des applications comme « Aidodys » et jeux vidéo interactifs sur tablettes ou ordinateurs fleurissent de jours en jours. Ils permettraient notamment d'améliorer les capacités attentionnelles, d'avoir une meilleure sensibilité des contrastes, toutefois ce type de jeux doit répondre à des paramètres bien spécifiques, et être utilisé avec modération, maximum 12 heures dans la semaine. [17] [18]

En 2017, Livingston et Happé estiment que l'intensité et l'efficacité de la compensation ne se ferait pas suivant le degré de sévérité du trouble dyslexique. Une adaptation pédagogique multidisciplinaire spécifique doit être mise en place, pour adapter la progression de l'enfant. Tout en rappelant que l'ensemble des outils mis en place ne permettent pas de guérir le trouble, mais cherchent à le compenser de façon la plus adéquate possible, suivant le profil du patient. [11]

### *D'autres techniques*

- *La théorie posturale* reste débattue dans le traitement de la dyslexie.

Les personnes dyslexiques présentent souvent un Syndrome de Déficience Sensorio-Proprioceptive (SDSP), caractérisé par une localisation spatiale différente entre les deux yeux. Cette dernière pourrait être rendue identique en modifiant les informations proprioceptives, un trouble au niveau de l'une des entrées sensorielles peut interférer avec l'autre et vice-versa. Cela pourrait indiquer que les enfants dyslexiques n'ont pas la capacité d'assimiler de multiples entrées sensorimotrices. [19] Le traitement repose sur quatre éléments principaux : semelles orthopédiques, prisme de faible puissance ; l'action sur la bouche ; des exercices musculaires et le maintien de postures spécifiques dans certaines circonstances.

Dr Quercia est partisan de cette théorie, tout en ayant conscience que ce traitement se base sur le fait que la dyslexie est un symptôme parmi tant d'autres, fruit d'une maladie sous-jacente. [20] À contrario, Mr Ramus évoque une « méthode fantaisiste ». [21]

Ainsi, à l'heure actuelle, tout ce que nous pouvons dire, c'est que les fondements scientifiques de la théorie posturale de la dyslexie restent très incertains, il s'agit davantage de faire des recommandations de santé publique.

- *Les livres « ZéToolu » et écritures spécifiques* comme « *OpenDyslexic* » prétendent augmenter la lisibilité, en incluant des styles en gras, des espacements plus grands entre les mots et les lignes. En revanche, suite à une étude réalisée sur la police « OpenDyslexic », les sujets dyslexiques ont trouvé que la police était « différente » ou « nouvelle » mais aucune amélioration de la vitesse de lecture, ni même de la précision pour ses sujets n'a été retrouvée. [22] [23]

## **CONCLUSION**

La dyslexie affecte de nombreuses personnes, et entrave le développement des compétences en lecture nécessaires autant pour la réussite scolaire, que pour l'avenir professionnel. Les dernières avancées scientifiques ont permis d'élucider de nombreux points à propos des différentes théories. De nouveaux moyens de diagnostic, de rééducation et de compensation se sont alors développés afin de faciliter le quotidien des personnes dyslexiques. Toutefois à l'heure actuelle, le seul traitement recommandé reste une prise en charge pluridisciplinaire.

Pour les futures années, le défi ne va pas être de trouver la cause unique, mais plutôt de comprendre comment les conditions sous-jacentes interviennent et interagissent pour produire ce trouble.

## **Bibliographie :**

- [1] Habib M. Dyslexie et troubles apparentés: une nouvelle thématique de santé publique, entre neuroscience et pédagogie. Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine. juin 2015;199(6):853-68.
- [2] Sturm VE, Roy ARK, Datta S, Wang C, Sible IJ, Holley SR, et al. Enhanced visceromotor emotional reactivity in dyslexia and its relation to salience network connectivity. Cortex. Janv 2021;134:278-95.
- [3] Krafnick, A. J., Flowers, D. L., Napoliello, E. M., & Eden, G. F. (2011). Gray matter volume changes following reading intervention in dyslexic children. *NeuroImage*, 57(3), 733-741.
- [4] Boros M, Anton J-L, Pech-Georgel C, Grainger J, Szwed M, Ziegler JC. Orthographic processing deficits in developmental dyslexia: Beyond the ventral visual stream. *NeuroImage*. 1 mars 2016;128:316-27.
- [5] Ramus F. Developmental dyslexia: specific phonological deficit or general sensorimotor dysfunction? *Curr Opin Neurobiol*. avr 2003;13(2):212-8.
- [6] White, S., Milne, E., Rosen, S., Hansen, P., Swettenham, J., Frith, U., & Ramus, F. (2006). The role of sensorimotor impairments in dyslexia: a multiple case study of dyslexic children. *Developmental Science*, 9(3), 237-255.
- [7] Franzen, L., Stark, Z., & Johnson, A. P. (2021). Individuals with dyslexia use a different visual sampling strategy to read text. *Scientific Reports*, 11(1).
- [8] Nguyen, B. N., et al (2021). Visual search efficiency and functional visual cortical size in children with and without dyslexia. *Neuropsychologia*, 155, 107819.
- [9] Uccula, A., Enna, M., & Mulatti, C. (2014). Colors, colored overlays, and reading skills. *Frontiers in Psychology*, 5.
- [10] Le Floch A, Ropars G. Left-right asymmetry of the Maxwell spot centroids in adults without and with dyslexia. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 25 oct 2017;284(1865):20171380.
- [11] Colé P, Sprenger-Charolles L. Chapitre 7. Nouvelles perspectives : les stratégies compensatoires dans la dyslexie. In: *La dyslexie : de l'enfant à l'adulte*. Paris: Dunod; 2021. p. 221-41. (Éducation Sup). [Internet]. [Consulté le 26 Sept 2021] Disponible sur : <https://www.cairn.info/la-dyslexie-de-l-enfant-a-l-adulte--9782100809318-p-221.html>
- [12] EyeBrain aide les orthoptistes à diagnostiquer la dyslexie PRVF. 2014 [Internet]. [Consulté le 29 Août 2021]. Disponible sur : <http://prvf.fr/eyebrain-aide-les-orthoptistes-a-diagnostiquer-la-dyslexie/>
- [13] Products e(ye) BRAIN - A suricog branch. [Internet]. [Consulté le 26 Sept 2021]. Disponible sur : <https://www.eyebrain.fr/index.php/products/>
- [14] Conseil Scientifique De L'Education Nationale. (2021, 1 janvier). Les lampes et Lunettes conçues pour les enfants dyslexiques : que dit la recherche ? [Communiqué de presse]. Disponible sur : [https://www.reseau-canope.fr/fileadmin/user\\_upload/Projets/conseil\\_scientifique\\_education\\_nationale/Note\\_CSEN\\_2021\\_01.pdf](https://www.reseau-canope.fr/fileadmin/user_upload/Projets/conseil_scientifique_education_nationale/Note_CSEN_2021_01.pdf)
- [15] Rouen. Contre les troubles DYS, une orthoptiste utilise la réalité virtuelle [Internet]. [Consulté le 27 Août 2021]. Disponible sur: <https://www.tendanceouest.com/actualite-386659-rouen-contre-les-troubles-dys-une-orthoptiste-utilise-la-realite-virtuelle?fbclid=IwAR2urUo-b5b7-trgyMWPQ7VOSj7GK7j7H3FmcpIbO-B5es5nD5qTnW56eXo>

[16] MoveR – Thérapie Immersive de rééducation [Internet]. [Consulté le 26 Sept 2021]. Disponible sur: <https://mover-vr.fr/>

[17] Glass BD, Maddox WT, Love BC. Real-Time Strategy Game Training: Emergence of a Cognitive Flexibility Trait. Wenderoth N, éditeur. PLoS ONE. 7 août 2013;8(8):e70350.

[18] Franceschini S, Gori S, Ruffino M, Viola S, Molteni M, Facoetti A. Action Video Games Make Dyslexic Children Read Better. Current Biology. 18 mars 2013;23(6):462 6.

[19] Mettey A, Bouvier A-M, Jooste V, Boucher Y, Quercia P. Are changes in the stomatognathic system able to modify the eye balance in dyslexia? Journal of Oral Biology and Craniofacial Research. avr 2019;9(2):166 71.

[20] Vieira S, Quercia P, Michel C, Pozzo T, Bonnetblanc F. Cognitive demands impair postural control in developmental dyslexia: A negative effect that can be compensated. Neuroscience Letters. 22 sept 2009;462(2):125 9.

[21] Le point sur l'approche posturologique pour la dyslexie. Ramus méninges. 2016 [Internet]. [Consulté le 31 Août 2021]. Disponible sur : <https://scilogs.fr/ramus-meninges/le-point-sur-lapproche-posturologique-pour-la-dyslexie/>

[22] Zétoolu ZTL Editions jeunesse. ZTL Éditions. [Internet]. [Consulté le 26 Sept 2021]. Disponible sur : <http://www.ztl-editions.fr/>

[23] Wery JJ, Diliberto JA. The effect of a specialized dyslexia font, OpenDyslexic, on reading rate and accuracy. Ann of Dyslexia. juill 2017;67(2):114 27.