



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par *l'Université Toulouse III - Paul Sabatier*
Discipline: *Neuropsychologie*

Présentée et soutenue par *Rodolphe Nenert*
31 Mars 2010

*La dyslexie développementale chez l'enfant : Comparaison de rééducations
en imagerie par résonance magnétique fonctionnelle et étude du déficit
auditif pré-attentif à l'aide de l'électro-encéphalographie*

JURY

Yves Chaix, INSERM, Université de Toulouse (Examinateur)
Pierre Celsis, INSERM, Université de Toulouse (Examinateur)
Jean-François Demonet, INSERM, Université de Toulouse (Co-Directeur)
Scania De Schonen, CNRS, Université Paris Diderot (Co-Directeur)
Nicole Bruneau, INSERM, Université François Rabelais, Tours (Rapporteur)
Catherine Liegeois-Chauvel, INSERM, Marseille (Rapporteur)

Ecole doctorale : *Clesco*

Unité de recherche : *Inserm U825 et CNRS U8158*

Directeur(s) de Thèse : *Scania de Schonen et Jean-François Demonet*

L'inventeur des dédicaces n'a pu être qu'un mendiant.

— *Antoine Furetière (1619–1688)*

Je dédie le présent travail de thèse à Claire W. Puisse ton souvenir
rester toujours.

RESUMÉ

La dyslexie développementale peut se définir comme étant un trouble de l'apprentissage de la lecture survenant en dépit d'une intelligence normale, de l'absence de troubles sensoriels ou neurologiques, d'une instruction scolaire adéquate, d'opportunités socio-culturelles suffisantes ; en outre, elle dépend d'une perturbation d'aptitudes cognitives fondamentales souvent d'origines constitutionnelles. Environ 4% à 8% des enfants souffriraient d'un tel trouble. Au sein du présent travail de thèse, nous avons dans un premier temps comparé les effets de trois rééducations différentes (Sémiophonie, Parole ralentie et classique) en comportemental et en imagerie cérébrale. Il fut montré une absence de différences d'effets entre ces trois rééducation, malgré un bénéfice commun, ainsi que des modifications d'activités cérébrales communes. La deuxième partie est consacrée à l'étude du déficit auditif pré-attentif, cette étude s'inscrivant dans le vaste projet européen Neurodys. La Mismatch Negativity obtenue avec des voyelles de différentes nationalités (Français, Finnois, Hongrois et Allemand), fut comparée entre enfants dyslexiques et enfants normo-lecteurs. Il fut montré que des corrélations entre le niveau de lecture et le traitement des voyelles corroborent l'hypothèse d'un traitement allophonique du langage chez les enfants dyslexiques.

Chacune de nos lectures laisse une graine qui germe.

— *Jules Renard*

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord mes parents sans qui je n'existerais pas.

Merci à mes deux directeurs de thèse de m'avoir supporté pendant ces longues années.

Merci ensuite à tous les étudiants de l'unité Inserm 825 (Déborah, Sébastien, Estelle, Olivier, Julien, Laure, ...) qui ont dû supporter mes blagues douteuses (mais toujours drôles) et tout particulièrement à Stéphanie pour ces longues heures d'avion, Mélanie d'avoir contribué à sauver mon post-doc, celles et ceux qui ont partagé mon bureau (dieu leur vienne en aide).

Merci au personnel de l'unité, Nicolas pour ces longues heures de discussions théoriques, Florent pour ses explications "parfois" incompréhensibles, Chantal pour m'avoir appris la négociation, Arnaud pour nous avoir fait tant rigolé, Irène et Martine, nexus administratifs de l'unité.

Merci à la communauté scientifique féminine de grenoble.

Merci enfin à Demet de m'avoir ouvert les portes d'un avenir radieux dans ce monde merveilleux peuplé de Bisounours, de dauphins, de beauté et de poésie, je veux bien sûr parler de la recherche.

Come mothers and fathers,
Throughout the land
And don't criticize
What you can't understand.
Your sons and your daughters
Are beyond your command,
Your old road is
Rapidly aging.
Please get out of the new one
If you can't lend your hand,
For the times they are a-changin'.

Bob Dylan.

TABLE DES MATIÈRES

I	ETAT DE L'ART	1
1	LA DYSLEXIE DÉVELOPPEMENTALE	3
1.1	Introduction	3
1.1.1	Historique	3
1.1.2	Définitions	4
1.2	Étiologie	5
1.2.1	Le diagnostic	5
1.2.2	Les différents types de dyslexie	6
1.2.3	Les troubles associés	12
1.3	Hypothèses sur les déficits cognitifs à l'origine de la dyslexie	14
1.3.1	Un déficit phonologique prépondérant	14
1.3.2	L'hypothèse des troubles du traitement des informations auditives	16
1.3.3	Troubles visuels	19
1.3.4	Troubles de la coordination motrice et de la mémoire procédurale	23
1.3.5	L'hypothèse du déficit d'ancrage, vers une unification?	24
1.4	Une origine biologique	27
1.4.1	Évidences anatomiques	27
1.4.2	Le fonctionnement du cerveau dyslexique	29
1.5	Programmes d'intervention dans les dyslexies de développement	34
1.5.1	Études comportementales	34
1.5.2	Les apports de l'imagerie fonctionnelle à l'évaluation des thérapies	40
II	ETUDE 1 : COMPARAISON DE RÉÉDUCTIONS CHEZ L'ENFANT ATTEINT DE DYSLEXIE DÉVELOPPEMENTALE : ÉTUDE COMPORTEMENTALE ET EN IMAGERIE PAR RÉSONANCE MAGNÉTIQUE FONCTIONNELLE.	47
2	ETUDE 1 : PROBLÉMATIQUE	49
2.1	Introduction	49
2.2	Contexte théorique comportemental	50
2.2.1	But de l'étude	51
2.2.2	Rééducation par parole modifiée	51
2.2.3	La sémiophonie	51
2.2.4	La rééducation standard	54
2.3	Contexte théorique en imagerie cérébrale	54
3	ETUDE 1 : MÉTHODOLOGIE UTILISÉE	57
3.1	Sujets recrutés	57
3.2	Procédure comportementale	59
3.2.1	Pré et post-test	59
3.2.2	Les programmes de rééducation	60
3.3	Procédure d'imagerie	65
4	ETUDE 1 : RÉSULTATS	71
4.1	Résultats comportementaux	71

4.1.1	Analyse des tâches de lecture en fonction de la fréquence des mots	73
4.1.2	Analyse des tâches de lecture en fonction de la régularité des mots	74
4.1.3	Analyse des tâches de répétition immédiate de non-mots	76
4.1.4	Analyses des tâches métaphonologiques	76
4.1.5	Bilan des analyses de tâches	78
4.1.6	Le rôle de l'école et de la maturation	79
4.1.7	Étude de l'effet test-retest	82
4.2	Résultats en imagerie cérébrale	83
4.2.1	Analyse en Voxel-based	83
4.2.2	Analyse en composantes indépendantes des activations cérébrales	86
4.2.3	Corrélations entre les activations cérébrales et les résultats comportementaux	91
5	ETUDE 1 :DISCUSSIONS ET CONCLUSIONS	95
5.1	Résultats comportementaux	95
5.2	Résultats en imagerie cérébrale	97
5.3	Conclusion générale	101
III ETUDE 2 : LE DÉFICIT AUDITIF PRÉ-ATTENTIF CHEZ L'ENFANT DYSLEXIQUE, ÉTUDE DE LA MISMATCH NEGATIVITY PROVOQUÉE PAR DES VOYELLES EUROPÉENNES.		
6	ETUDE 2 : PROBLÉMATIQUE	105
6.1	Introduction	105
6.2	Arrière-plan théorique	106
7	ETUDE 2 : MÉTHODOLOGIE UTILISÉE	111
7.1	Les participants de l'étude	111
7.2	Les différents stimuli utilisés	111
7.3	Procédure expérimentale	113
7.4	Enregistrement des potentiels évoqués	114
7.5	Analyses	115
8	ETUDE 2 : RÉSULTATS	117
8.1	Analyse des stimuli Standards VS stimuli Déviants	117
8.2	Analyse des caractéristiques de la MMN	119
8.2.1	Comparaison de l'amplitude du pic entre dyslexiques et contrôles	120
8.2.2	Comparaison de la latence du pic entre dyslexiques et contrôles	120
8.3	Corrélation entre la MMN et les habiletés métaphonologiques	122
9	ETUDE 2 :DISCUSSIONS ET CONCLUSIONS	125
9.1	Analyses statistiques sur l'amplitude et la latence du pic MMN	125
9.2	Analyse par fenêtre temporelle	126
9.3	Analyses en corrélation	128
9.4	Conclusion	129
10	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	131
IV APPENDICES		
A	L'IMAGERIE PAR RÉSONANCE MAGNÉTIQUE FONCTIONNELLE	135
A.1	L'imagerie par résonance magnétique	135
A.1.1	Introduction aux images numériques	136

A.1.2	L'aimantation	138
A.1.3	La résonance	138
A.1.4	La relaxation	139
A.2	L'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle	141
A.2.1	Les bases neurophysiologiques du signal en IRMf	142
A.2.2	La résolution temporelle de l'IRMf	145
A.2.3	La résolution spatiale de l'IRMf	145
A.2.4	L'amplitude des signaux d'activation en IRMf	146
A.3	La mise en oeuvre d'un protocole expérimental en IRMf	146
A.3.1	Les protocoles expérimentaux	146
A.3.2	Les contraintes expérimentales	148
A.3.3	Les acquisitions d'images anatomiques complémentaires aux images fonctionnelles	149
A.4	L'analyse des données en IRMf	149
A.4.1	Pré-traitements	149
A.4.2	Normalisation	150
A.4.3	Analyses statistiques	150
B	LES POTENTIELS ÉVOQUÉS	153
B.1	Enregistrement des différences de potentiel	153
B.1.1	Les électrodes	153
B.1.2	La référence	154
B.1.3	L'amplification du signal	155
B.1.4	Le filtrage	155
B.1.5	L'enregistrement	155
B.2	Les potentiels évoqués	155
B.2.1	Traitements préliminaires	156
B.2.2	Obtention des potentiels évoqués	156
B.2.3	Visualisation des potentiels évoqués	157
B.3	Analyses statistiques	157
B.3.1	Comparaison de latences et d'amplitudes de pics	157
B.3.2	Tests t en séries appariées	158
C	ARTICLE PUBLIÉ	159
	BIBLIOGRAPHIE	181

TABLE DES FIGURES

FIG. 1	Modèle de lecture à double voie de Coltheart.	7
FIG. 2	Test de perception catégorielle chez un adulte normo-lecteur et chez un enfant dyslexique	18
FIG. 3	L'incapacité à ancrer le stimulus de référence (tiré de Ahissar [6]). A gauche, on soumet des paires de sons de fréquences différentes à des sujet contrôles (en blanc) et dyslexiques (en rouge). Leur performance à rapporter le son le plus aigu est équivalente. A droite, chaque paire est composée d'un son aléatoire plus un son référence fixe. On peut voir que la performance des contrôles s'améliore grandement alors que celles des dyslexiques est mauvaise.	25
FIG. 4	Cartes fonctionnelles des 5 tâches en IRMf	93
FIG. 5	Images des activations obtenues par l'analyse en composantes indépendantes	94
FIG. 6	Le spectre sonore des stimuli verbaux utilisés en EEG	113
FIG. 7	Le spectre sonore des stimuli verbaux utilisés en EEG	114
FIG. 8	Courbes EEG des sons standards et déviants pour chaque groupe	117
FIG. 9	Courbes EEG des MMN pour chaque stimulus	119
FIG. 10	Amplitudes des pics Mismatch Negativity (MMN) pour chaque stimulus, pour chaque électrode, pour le groupe contrôle.	121
FIG. 11	Latences des pics MMN pour chaque stimulus, pour chaque électrode, pour le groupe contrôle.	122
FIG. 12	Exemple d'image obtenue par tractographie IRM	136
FIG. 13	Exemple d'image par angiographie IRM	137
FIG. 14	Exemple d'image par spectroscopie IRM	138
FIG. 15	Exemple d'image IRM de perfusion	139
FIG. 16	Moment magnétique résultant d'un ensemble de spins placés dans un champ magnétique	140
FIG. 17	Aimant et antenne utilisés pour l'acquisition d'images IRM du cerveau	141
FIG. 18	Les différentes phases de la réponse vasculaire lors d'une activation cérébrale	143
FIG. 19	Décours temporel de la réponse hémodynamique	144
FIG. 20	Paradigmes bloc et événementiel en IRMf	148
FIG. 21	Modèles d'électrode utilisés en EEG	154

FIG. 22 Modèles d'électrode utilisés en EEG 157

LISTE DES TABLEAUX

TAB. 1	Caractéristiques des groupes groupes d'enfants dyslexiques (Étude en IRMf) 58
TAB. 2	Échantillon d'exercices de la rééducation standard 64
TAB. 3	Mots utilisés en tâche de lecture en IRMf 67
TAB. 4	Mots irréguliers utilisés en tâche de lecture en IRMf 68
TAB. 5	Pseudo-mots utilisés en tâche de lecture en IRMf 68
TAB. 6	Sons utilisés en tâche de discrimination auditive en IRMf 69
TAB. 7	Mots utilisés en tâche de rimes en IRMf 69
TAB. 8	Moyenne des scores de la batterie BELEC 72
TAB. 9	Scores de lecture selon la fréquence des mots 75
TAB. 10	Scores de lecture selon la régularité des mots 75
TAB. 11	Scores aux tâches de répétition de non-mots 76
TAB. 12	Scores aux tâches de métaphonologie 78
TAB. 13	Scores aux tâches de métaphonologie(suite) 79
TAB. 14	Table des clusters pour les tâches de lecture en IRMf, toutes rééducations confondues. 84
TAB. 15	Table des clusters pour les tâches de discrimination de sons et détection de rimes en IRMf, toutes rééducations confondues. 85
TAB. 16	Activations trouvées avant rééducation en analyse par composantes indépendantes 87
TAB. 17	Activations trouvées avant rééducation en analyse par composantes indépendantes (suite) 88
TAB. 18	Activations trouvées avant rééducation en analyse par composantes indépendantes(suite 2) 89
TAB. 19	Caractéristiques des sujets de l'étude EEG 112
TAB. 20	Fréquence des formants des stimuli utilisés dans l'étude EEG 112
TAB. 21	Fenêtres de différences significatives entre standard et déviant 118
TAB. 22	Corrélations entre MMN et scores métaphonologiques, groupe dyslexique. 123
TAB. 23	Corrélations entre MMN et scores métaphonologiques, groupe contrôle. 123
TAB. 24	Exemples de valeurs de densité de protons 142

ACRONYMES

ACI	Analyse en Composantes Indépendantes
ACP	Analyse en Composantes Principales
ADHD	Attention-Deficit Hyperactivity Disorder
API	Association de Posturologie Internationale
ATNR	Asymmetrical Tonic Neck Reflex
BA	Brodman Area
BOLD	Blood Oxygen Level Dependant
DS	Déviation Standard
EEG	Electro-Encéphalographie
EP	Embedded Phonics
FFW	FastForward
HRF	Hemodynamic response function
IRM	Imagerie par Résonance Magnétique
IRMf	Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle
LIPS	Lindamood Phoneme Sequencing Program for Reading, Spelling, and Speech
LLI	Language Learning Impairment
MEG	Magnéto-Encéphalographie
Mod	Entraînement par parole modifiée
MMN	Mismatch Negativity
RDK	Random Dot Kinetogram
RMN	Résonance Magnétique Nucléaire
ROI	Region Of Interest
Sem	Sémiophonie
Stand	Entraînement Standard
TDAH	Trouble Déficit de l'Attention avec Hyperactivité
TEP	Tomographie par Emission de Positons
TLO	Trouble du Langage Oral
TRIA	Traitement Rapide des Informations Auditives
VOT	Voice Onset Time

INTRODUCTION GÉNÉRALE

D'après l'Académie Française, la lecture peut être définie comme le fait de reconnaître, en les parcourant des yeux, les signes graphiques qui transcrivent une langue, les sons auxquels ils correspondent ou les combinaisons qu'ils forment, de manière à saisir leur sens. (Le braille peut être apparemment considéré comme une lecture des yeux indirecte). Nul ne doute que depuis que l'homme a voulu transmettre du sens au travers de signes écrits, certains ont éprouvé des difficultés à comprendre ces signes. Pourtant, pour le lecteur moderne averti, lire un texte paraît extrêmement simple, et devient même par moment quasiment automatique. Dès lors, il est aisé de comprendre que l'étude de ce processus (si simple en apparence et qui apparaît tellement complexe lorsqu'on essaye d'en effleurer le fonctionnement), ainsi que des pathologies associées, ait pu intéresser des générations de chercheurs. Il est donc aussi naturel que ces mêmes chercheurs, se soient beaucoup intéressés à la genèse de la lecture, c'est-à-dire son apprentissage chez l'enfant.

Les progrès récents en Neurosciences ont permis de rendre visible l'activité cérébrale constitutive de la lecture. Toutes ces études ont permis la création d'un savoir neurobiologique intégrant des connaissances provenant de divers domaines tels que la linguistique, la psychologie développementale, la neurologie, la génétique, l'épidémiologie, ainsi que l'éducation. Les perspectives qui ressortent d'une telle intégration multi-niveau, en particulier au niveau des processus attentionnels permettant de déchiffrer les codes lus, suggèrent de nouvelles voies d'exploration scientifique et peut-être de nouvelles thérapies et stratégies permettant d'améliorer la lecture. Si l'on reprend la définition de la lecture par l'Académie Française, on se rend compte que plusieurs sortes de dysfonctionnements peuvent être impliquées dans les difficultés à déchiffrer le langage écrit. Bien qu'étant normalement vus, la reconnaissance des signes peut être atteinte. Le parcours des yeux des dits signes peut-être également une source de difficultés. Enfin, si la reconnaissance des sons d'une langue donnée est altérée, le processus de lecture peut également être perturbé.

L'apprentissage de la lecture est une étape fondamentale de l'éducation de l'enfant dans nos cultures et est devenu un facteur environnemental contribuant à orienter le développement cérébral de l'enfant. Cela se fait grâce à la participation de nombreux réseaux cognitifs travaillant de concert afin de permettre à l'enfant de développer de nouvelles aptitudes. La majeure partie des enfants apprennent à lire et à écrire et parviennent à un niveau d'habileté suffisant. Cependant, une partie non négligeable d'entre eux (entre 4% et 9%), se révèle avoir de sévères problèmes dans ce domaine [267]. Une majeure partie de ces enfants sont dyslexiques. Selon l'expertise collective de l'Inserm (2007), ce trouble spécifique de l'apprentissage du langage écrit toucherait au minimum 3% à 5% des enfants de 10 ans. Même pour les chiffres les plus optimistes, l'incidence de la dyslexie dépasse celles, cumulées, du retard mental, de l'infirmité motrice cérébrale et de l'épilepsie; à ce

titre déjà, elle représente un problème majeur de santé publique.

Un enfant atteint de dyslexie va spontanément tenter (consciemment ou pas) de mettre en place des stratégies compensatoires, mais en général, ce processus est très difficile, voire impossible dans certains cas. Il est donc nécessaire d'aider ces enfants à l'aide de rééducations spécifiques, dont l'élaboration et l'efficacité se trouvent freinées par la grande hétérogénéité des phénotypes rencontrés chez les personnes dyslexiques. La neuroimagerie fonctionnelle pourrait permettre de pallier cette difficulté en essayant d'une part, d'établir des liens entre les profils comportementaux et les patterns d'activation cérébrale au cours de la lecture, et d'autre part en observant les changements de ces patterns et de ces comportements suite à un type de rééducation, afin d'estimer quelle serait la meilleure rééducation possible pour un individu présentant un couple pattern cérébral-comportement particulier.

Je vais ici décrire le travail de thèse réalisé au sein du Laboratoire psychologie de la perception (CNRS UMR 8158) de Paris V et de l'unité INSERM 825 (Imagerie cérébrale et handicaps neurologiques) de l'hôpital de Purpan, Toulouse. La première partie sera dédiée à la présentation d'une revue de la littérature concernant la dyslexie ainsi que ses sous-types potentiellement identifiables, en résumant les différentes théories sous-jacentes, ainsi que leurs corrélats neuronaux. La seconde partie concerne le premier des deux projets de recherche auxquels j'ai participé, et qui a pour but la comparaison de trois méthodes de rééducation appliquées à des enfants atteints de dyslexie développementale. Cette comparaison fût effectuée à l'aide d'une batterie de tests comportementaux (Belec) et également par l'utilisation de l'Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle (IRMf). J'énoncerai d'abord les problématiques issues de la littérature puis je décrirai les méthodes utilisées ainsi que les résultats correspondants. Je conclurai ensuite sur les résultats et perspectives de cette étude. Le deuxième projet de recherche sur lequel j'ai travaillé sera l'objet de la troisième partie de la présente thèse. Ce projet a pour but l'étude des probables déficits auditifs pré-attentifs chez les enfants dyslexiques. Dans la quatrième et dernière partie de la thèse, je ferai une synthèse des principaux résultats et je décrirai en quoi ils permettent d'améliorer notre compréhension de la dyslexie développementale ainsi que ses possibilités de rééducation. Je conclurai enfin, en proposant quelques perspectives de recherche.

J'ai également participé à un troisième projet de recherche, qui avait pour but d'étudier l'effet de deux rééducations (phonologique et visuo-attentionnelle) en protocole croisé sur des enfants dyslexiques. Cette recherche ayant déjà fait l'objet d'une thèse de Doctorat [138], elle ne sera pas détaillée ici.

Toutefois, la publication scientifique qui découle de ce projet est fournie en Annexe C (page 159). Cet article sera prochainement publié dans la revue "Behavioral Neurology" (<http://www.iospress.nl>).

Première partie

ETAT DE L'ART

LA DYSLEXIE DÉVELOPPEMENTALE

Dans ce chapitre, nous proposons un état de l'art sur la dyslexie développementale. Sans avoir la prétention d'être complet, il contient cependant les idées et théories majeures communément utilisées dans la recherche actuelle, et se veut ouvert. Un bref historique aboutissant aux différentes définitions de la dyslexie développementale introduira cette partie. Puis, nous dresserons un panel des différentes théories décrites comme expliquant les troubles dyslexiques. Après cela, nous donnerons un aperçu des corrélats neurofonctionnels, corrélats dont on a suggéré qu'ils désignent les origines de la la dyslexie. Enfin, nous aborderons les différentes rééducations qui ont été élaborées, en discutant de leurs effets, tant sur le plan comportemental qu'au niveau cérébral.

On peut également parler de dyslexie de développement

1.1 INTRODUCTION

1.1.1 Historique

Le premier descriptif connu d'un trouble de lecture date de 1896. Pringle Morgan, médecin anglais, décrit le cas d'un adolescent dans l'incapacité de lire et écrire, alors qu'il était décrit comme ayant une intelligence normale¹. Morgan émettra l'hypothèse que ce garçon de 14 ans souffre de ce qu'il appela une cécité congénitale du mot (congenital word blindness), pour faire un parallélisme avec les cécités verbales observées chez des patients cérébro-lésés, pour la majeure partie à la suite d'accidents. Le terme de « cécité » ne sera pas sans conséquences, puisque, en 1917, un ophtalmologiste du nom de Hinshelwood se passionnera pour le sujet. Il publiera de nombreux cas d'enfants qui, à l'instar de celui décrit par Morgan, sont normalement intelligents, mais qui présentent des difficultés à lire [125]. Reprenant le terme de Morgan pour le titre de son ouvrage, il est cependant le premier à parler de dyslexie. Il étudie les cas des patients de Jules Déjerine présentant une cécité verbale [99], et par analogie, il avance que la dyslexie proviendrait d'un défaut de développement du lobe pariétal gauche. Parallèlement, se développe un courant plus comportemental au travers de pédagogues. Au sein de ce courant, on peut citer notamment Hollingworth, qui remet en question l'origine médicale de ce trouble et parle plutôt de manque de motivation ou de problème psychologique. La réticence de ces personnes concerne surtout l'évocation d'une sorte de maladie, et qui plus est, vu son caractère congénital, de nature incurable. C'est à Samuel Torrey Orton, neuropsychiatre et neuropathologiste américain à Philadelphie, que reviendra l'installation définitive de la dyslexie dans l'histoire médicale. Passionné par toute idée nouvelle, il poursuivra, conjointement à ses hautes responsabilités professionnelles, une activité de recherche sur la dyslexie l'amenant à examiner de 1920 à 1940 près

En France, on utilise plutôt le terme d'aveuglement du mot

On peut noter que, à l'heure actuelle, on trouve encore des personnes pensant que la dyslexie est un mot scientifique apposé sur un simple manque de motivation de l'enfant

¹ Voici ce que déclara le jeune garçon : « Je ne comprends pas ce que j'ai, je suis intelligent, doué pour les mathématiques ; si mon professeur ne cotait que les 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 les efforts m'est impossible : lire et écrire. »

“stroph” vient du grec et signifie “retourné”

de trois mille dyslexiques de tous âges ; ces recherches déboucheront entre autres sur la mise au point de rééducations spécifiques. Orton utilisera le terme « word blindness », mais, soulignant que, en dehors de la lecture, la perception visuelle et « visuo-spatiale » paraissait excellente chez ces enfants, il lui préférera le terme de « troubles de lecture spécifiques ». Mettant l'accent sur ce qui lui paraissait être une caractéristique fondamentale, la production en sens inverse, il forgea le terme « strephosymbolie ». Le déterminisme cérébral, proposé par Orton, provient du constat, à la fois, de ces erreurs particulières, et d'une fréquence élevée de patients ayant une latéralisation mixte ou croisée : ce ne serait pas une dysfonction focalisée du cerveau qui serait en cause, mais une anomalie de « dominance » hémisphérique ; dans ces conditions, l'hémisphère gauche perdrait la suprématie qu'habituellement il exerce sur le droit. Il mettra aussi en évidence la fréquence accrue de dyslexie chez les garçons ainsi que sa survenue familiale, donc une base génétique probable. Contrairement aux hypothèses neurologiques précédentes et vraisemblablement grâce à la diffusion massive de ses méthodes de rééducation, les théories cérébrales d'Orton reçurent un accueil favorable parmi les pédagogues. Toutefois, avec la propagation de ces notions, leur interprétation se vit déviée du sens premier que leur donnait Orton ; ceci débouchera malencontreusement sur la notion de troubles « instrumentaux » :

- troubles de la perception visuo-spatiale.
- troubles de l'orientation latérale.
- dominance manuelle gauche, sources de bien des errements dans les recherches sur la dyslexie.

En effet, l'immense majorité des recherches ayant trait au langage, portent sur des sujets choisis comme droitiers

Malgré cela, la vigoureuse impulsion scientifique donnée par les travaux d'Orton s'est poursuivie aux États-Unis. Vers la fin de sa vie, Orton s'étant vu refuser tout financement officiel pour ses recherches, réussit à les poursuivre grâce à sa pratique privée. La création, en hommage à sa mémoire, de la puissante « Orton Dyslexia Society », rassemblant des fonds considérables, a permis aux États-Unis de nombreuses recherches, entre autres, les travaux neuro-anatomiques de Galaburda (Voir plus bas). La dyslexie est reconnue aux États-Unis comme trouble spécifique du langage écrit dans un premier temps par un vote du congrès en 1960, puis par une loi en 1970 et dans l' « Education for all handicapped children act » en 1978 comme étant : « un écart significatif entre réalisations scolaires en lecture et possibilités intellectuelles mesurées par le QI ; l'exclusion des causes expliquant cet écart constitue un autre des critères diagnostiques majeurs ; parmi ces causes, des troubles de perception sensorielle, des problèmes psychiatriques primaires, des pathologies neurologiques lourdes, un manque d'opportunité scolaire suffisante et de stimulations socio-culturelles. »

On trouvera le terme d'aveuglement du mot dans les publications scientifiques jusqu'aux années 50

1.1.2 Définitions

En Europe, sous l'impulsion notamment de Mac Donald Critchkey, le caractère inattendu de la dyslexie et sa survenue chez des enfants en tous points intelligents et normaux par ailleurs, sera reconnu au terme de la réunion d'un collège d'experts sous les auspices de la « World Federation of Neurology » (1968). Une définition opérationnelle de la dyslexie y est avancée : *trouble de l'apprentissage de la lecture survenant en dépit d'une intelligence normale, de l'absence de troubles sensoriels ou neurologiques, d'une instruction scolaire adéquate, d'opportunités socio-culturelles*

suffisantes ; en outre, elle dépend d'une perturbation d'aptitudes cognitives fondamentales souvent d'origines constitutionnelles

Cette définition peut être critiquée car elle définit le trouble par des critères négatifs. Ainsi, on ne définit pas vraiment ce qu'est la dyslexie mais plutôt ce qu'elle ne doit pas être. Critchley [63] va ajouter des critères positifs à cette définition. Il parle du fait que la dyslexie persiste jusqu'à l'âge adulte, ainsi que les troubles associés (comme la dysorthographe²), qu'elle est prédominante chez les garçons, que les erreurs produites sont spécifiques au trouble et enfin, qu'il y a une incidence familiale. De plus, il oppose la dyslexie de développement aux autres troubles de la lecture. Debray-Ritzen et Mélékian [66] définissent la dyslexie comme « une difficulté spécifique et durable d'apprentissage de la lecture et de l'écriture, et d'acquisition de leur automatisme, chez des enfants normalement intelligents, normalement scolarisés, indemnes de troubles sensoriels ». On voit apparaître ici la notion de trouble de l'écriture, donc pour ces auteurs, la dysorthographe fait partie de la dyslexie. Benton [22] parle de dyslexie de développement et la définit comme étant « un échec inexplicable de l'apprentissage de la lecture par un enfant dont le niveau d'intelligence, le développement du langage oral, et les capacités sensorielles apparaissent être tout à fait adéquats pour permettre le développement des compétences de lecture, qui a bénéficié d'une instruction scolaire conventionnelle pour apprendre à lire, et qui au début de sa scolarité avait une motivation normale pour apprendre à lire ». Cette définition, qui se fait par des critères négatifs, pose problème. En effet, elle admet qu'un trouble du langage oral est discriminant, or, un trouble à l'oral peut être lié à une dyslexie sans que l'on sache nécessairement quel trouble est à l'origine de l'autre. Cette définition peut exclure de nombreux cas. Rutter et Yule [250] font la différence entre le « retard simple de lecture » et le « retard spécifique de lecture ». Dans le premier cas le retard s'explique par un niveau intellectuel général plus bas que la normale. Dans le deuxième cas, le retard intervient chez des enfants normalement intelligents mais pour lesquels le niveau de lecture est inférieur de deux Déviation Standard (DS) par rapport à la normale. La commission sur la dyslexie du Conseil de la Santé au Pays Bas [101] a quant à elle défini les circonstances dans lesquelles on pouvait parler de dyslexie : « La dyslexie est présente lorsque l'automatisation de l'identification des mots (lecture) et de l'écriture des mots ne se développe pas ou se développe de manière très incomplète ou avec une grande difficulté ».

1.2 ÉTIOLOGIE

1.2.1 *Le diagnostic*

Nous allons essayer de définir la dyslexie selon des critères qui permettent concrètement de poser un diagnostic. Qu'est-ce qui permet aujourd'hui de diagnostiquer une dyslexie de développement ? Quels critères doit-on retenir ? Si l'on reprend les définitions vues précédemment, on constate que le premier critère consiste à éliminer un retard

² La dysorthographe est un trouble d'apprentissage caractérisé par un défaut d'assimilation important et durable des règles orthographiques (altération de l'écriture spontanée ou de l'écriture sous dictée). Celui-ci perturbe, dans des proportions variées, la conversion phono-graphique, la segmentation des composants de la phrase, l'application des conventions orthographiques (dites règles d'usage), et enfin l'orthographe grammaticale (marques flexionnelles que sont les accords et conjugaisons).

une grande partie des recherches récentes ne prend en compte que les sujets ayant 18 mois de retard ou plus

global chez l'enfant en s'assurant que ses compétences intellectuelles générales sont correctes. Puis, le niveau de lecture doit être étudié. Il faut au moins 18 mois d'écart entre les performances de lecture attendues et celles observées pour pouvoir parler de dyslexie. Un retard se situant entre 12 et 18 mois indique un retard de lecture. Dans les pays francophones, le test de lecture le plus souvent utilisé est l'Alouette [153] qui prend en compte la vitesse et la qualité de lecture. D'autres tests de lecture peuvent être utilisés pour évaluer le niveau de compréhension, la vitesse, la qualité ; ainsi que des tests permettant d'évaluer les troubles associés. Certains de ces tests et critères seront décrits plus loin, car ils ont été utilisés dans les deux protocoles de recherche (parties 2 et 3) de ce travail. En résumé, le diagnostic est posé de manière négative, par élimination des explications alternatives, et il n'y a pas encore de consensus quant à l'existence de critère réellement pathognomonique de la dyslexie bien que la lecture de mots isolés semble être un bon candidat [111, 288]. Les praticiens n'utilisent donc comme définition que la différence entre le niveau de lecture atteint et le niveau intellectuel [288].

1.2.2 Les différents types de dyslexie

La question de l'existence de sous-groupes de dyslexiques se pose depuis de nombreuses années. Selon les auteurs, la dyslexie présente ou non une origine commune. Certains émettent l'hypothèse selon laquelle la dyslexie reposerait sur une sémiologie unique, avec un déficit suffisamment central dans la lecture pour expliquer les différentes formes observables. De nombreuses oppositions ont également été décrites (par exemple « dyslexie génétique » vs. « dyslexie avec fonctionnement cérébral minime » [13], « dyslexie auditive », vs. « dyslexie visuelle » [229, 199], « faiblesse en lecture globale de mots » vs. « troubles du décodage » [192]. . .). Néanmoins, la façon la plus classique de définir les sous-groupes de dyslexie provient de la tradition neuropsychologique des doubles dissociations³. Au sein de cette approche pluraliste, on peut distinguer deux grandes classifications. La première fût suggérée par Boder [36], et propose deux types de dyslexies : les dyslexies dysphonétiques avec atteinte phonologique dans la discrimination du discours et les dyslexies dyséidétiques avec déficit dans la perception visuelle. La seconde, suggérée par d'autres auteurs [48] prend appui sur les modèles de lecture à deux voies et distingue les dyslexies phonologiques (correspondant à des difficultés d'association graphèmes/phonèmes⁴ entraînant des perturbations dans la lecture des mots nouveaux), les dyslexies dites de surface (correspondant à une difficulté lexicale d'association entre la forme visuelle — orthographique — et la forme phonologique entraînant de grosses difficultés de lecture des mots irréguliers) et les dyslexies mixtes associant les deux types de troubles (phonologique et de surface). Cette distinction entre dyslexie phonologique et dyslexie de surface s'appuie en partie sur le modèle d'apprentissage de la lecture de Coltheart [61]. Ce modèle (Figure 1)

³ Le terme de double-dissociation fut introduit en 1955 par H.L. Teuber [333]. C'est la démonstration que chacune des deux manipulations expérimentales engendre des effets différents sur deux variables dépendantes ; la première manipulation affecte une variable et pas l'autre, alors que la deuxième manipulation préserve la première variable et affecte la seconde.

⁴ Le *graphème* peut se définir comme étant la plus petite unité distinctive de l'écriture. Le *phonème* est la plus petite unité de langage parlé

suppose deux voies de lecture, une lexicale et une non-lexicale. L'atteinte de la voie non-lexicale (normalement utilisée lorsque le mot lu est inconnu, comme dans le cas de la lecture de pseudo-mots) s'associerait à la dyslexie de type phonologique alors qu'une atteinte de la voie lexicale (dont le traitement est supposé plus rapide) serait plutôt associé à la dyslexie dite de surface.

Un pseudo-mot est un mot qui n'existe pas mais qui est cependant prononçable

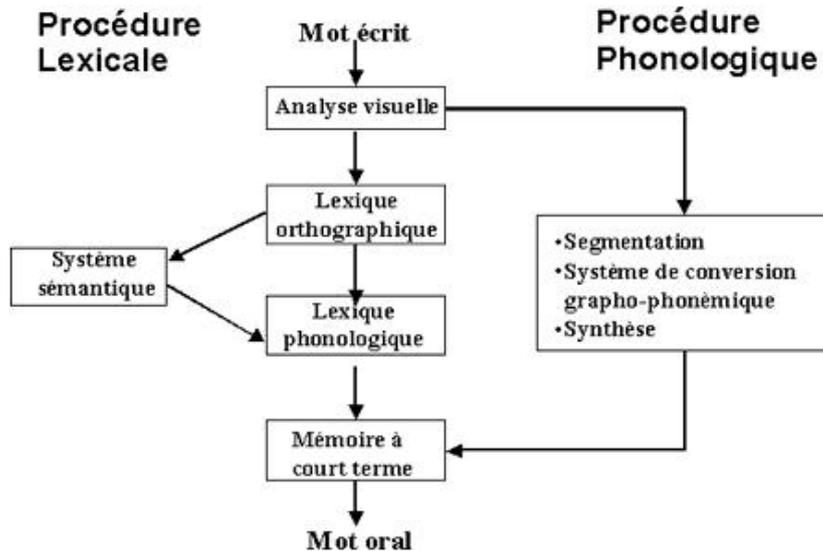


FIG. 1: Modèle de lecture à double voie de Coltheart.

Nous présenterons ici les dyslexies phonologique et de surface selon la classification de Castle et Coltheart, qui est la plus classiquement utilisée lors des examens réalisés en clinique comme en recherche. Nous nous concentrerons ensuite sur la dyslexie de type mixte, en reprenant plus en détail les modèles de Boder et de Coltheart. Enfin, nous évoquerons d'autres classification existantes.

Classification selon le type de lecture

Comme vu précédemment, elle consiste en la mise en opposition des troubles affectant l'une et/ou l'autre des deux voies de lecture. Ainsi, nous pouvons dégager trois principaux types de dyslexie : les dyslexies phonologique, de surface et mixte. Une brève description en sera donnée avant de décrire les principaux travaux qui ont permis de les mettre en évidence.

LA DYSLEXIE PHONOLOGIQUE : Elle se caractérise par une atteinte sélective de la lecture de pseudo-mots ce qui traduirait une atteinte de la voie d'assemblage de lecture (association graphèmes/phonèmes). La lecture de mots réguliers et irréguliers est, quant à elle, relativement préservée. La dissociation entre lecture de mots et de pseudo-mots est en général d'autant plus marquée que les items sont longs. Il est également fréquent que les erreurs dépendent de la complexité phonologique de l'item à lire, celles-ci étant plus nombreuses sur les items qui incluent un ou plusieurs groupe consonantique. Dans la dyslexie phonologique, les erreurs se caractérisent par des lexicalisations sur les pseudo-mots telles que l'on observe :

- La production de mots visuellement et/ou phonologiquement proches des pseudo-mots (« codeau » devient « cadeau »).
- Des paralexies phonémiques sur les mots et les pseudo-mots : il y a substitution, omission, déplacement ou addition d'un ou plusieurs phonèmes (« brinte » devient « printe », « fracture » devient « facure »).
- Des erreurs morphologiques : le mot produit a la même racine que le mot cible (« politicien » devient « politique »).

La dyslexie phonologique s'accompagne généralement d'une dysorthographie phonologique caractérisée par un trouble sélectif de l'écriture des pseudo-mots et beaucoup d'erreurs ne sont pas phonologiquement plausibles (le mot écrit, s'il est prononcé, ne correspond pas au mot cible).

Différents troubles cognitifs ont été observés chez les dyslexiques phonologiques, notamment un trouble de la conscience phonologique ainsi qu'une limitation des capacités de mémoire verbale à court terme. Les sujets présentent ainsi des difficultés à manipuler volontairement les sons de la langue, comme s'ils n'avaient pas conscience de la nature segmentale de la parole et de l'existence d'unités sublexicales, notamment phonémiques.

Les sujets présentent des scores faibles aux épreuves métaphonologiques : dénombrement des phonèmes d'un mot présenté oralement, biais orthographiques dans les tâches de rimes, biais orthographiques dans les tâches de contrepèterie ou d'acronymie. De plus, la mémoire verbale à court terme semble touchée mais de façon subtile : les sujets dyslexiques phonologiques ne présentent pas d'effet de similarité phonologique dans les tâches d'empan de mot (par exemple, chez le sujet normo-lecteur, une liste de mots qui riment est plus difficilement apprise par coeur qu'une liste de mots qui ne riment pas, ce qui n'est pas le cas chez les sujets atteints de dyslexie de type phonologique).

LA DYSLEXIE DE SURFACE : Elle se caractérise par un trouble sélectif de la lecture des mots irréguliers, interprété comme une atteinte spécifique de la voie d'adressage (voir figure 1). La lecture des mots et des pseudo-mots est largement préservée. La compréhension des sujets dyslexiques de surface est ainsi basée sur la forme phonologique des mots. Les symptômes principaux sont : une lecture lente et laborieuse (l'enfant ne parvient pas à l'automatisation et utilise toujours les règles de conversion Graphème-Phonème), le lexique orthographique est par conséquent restreint ; ces enfants ont presque une incapacité à mettre en mémoire les traces orthographiques en relation avec les mots de la langue ; les mots irréguliers sont lus difficilement et sont souvent « régularisés », c'est à dire qu'il y a une application systématique des règles de transcodage graphème/phonème (tabac devient /tabak/, album est lu /albym/) ; les homophones non homographes ne sont souvent pas discriminés. Le sens est attribué en fonction du son et pas de la forme orthographique du mot. Il s'agit sans doute du symptôme le plus marquant chez ces enfants. En effet, ils ne semblent pas posséder de connaissance orthographique sur les mots. Dans tous les cas, les dyslexiques de surface présentent une dysorthographie telle que les mots écrits, et surtout irréguliers, présentent des erreurs phonologiquement plausibles : les mots irréguliers sur le plan orthographique sont régularisés au niveau phonologique, le mot écrit est alors phonologiquement correct.

un mot irrégulier est un mot dont la prononciation est irrégulière (par exemple : « femme »)

Ainsi, même au sein de la population des dyslexiques exempts de comorbidités il existe une hétérogénéité qui a permis à plusieurs hypothèses de voir le jour et de coexister. Selon Uta Frith [29], cette dyslexie résulterait d'un trouble de la mise en oeuvre de la procédure alphabétique et donc d'une difficulté à accéder ensuite à la procédure orthographique. Une approche du problème développée par Sylviane Valdois [41, 331] suggère qu'un trouble spécifique au matériel orthographique de nature visuo-attentionnelle rendrait compte d'un bon nombre de ces cas.

LA DYSLEXIE MIXTE : Il s'agit ici d'une forme de dyslexie de développement qui associe les difficultés de la dyslexie de surface et celles de la dyslexie phonologique. Elle met donc en cause simultanément les voies d'adressage et d'assemblage. Cette forme de dyslexie est relativement fréquente. En effet, il est rare de retrouver des cas « purs » de dyslexie phonologique ou visuelle. La plupart des enfants dyslexiques éprouve des difficultés tant dans l'utilisation de la voie d'assemblage que de la voie d'adressage. Il faut ajouter à cela que les enfants dyslexiques peuvent présenter des troubles concernant la rapidité de traitement des informations verbales et non verbales, des problèmes avec la mémoire de travail, des déficits attentionnels, des troubles du langage oral (cf. section suivante), etc. . .

Boder [35, 36], citée précédemment, a été la première à tenter un classement des dyslexies développementales. Selon son hypothèse, des profils différents d'erreurs de lecture doivent indiquer un dysfonctionnement différencié des aires cérébrales. Les lecteurs (même apprentis), pouvant s'aider du contexte pour lire, elle a présenté à une centaine d'enfants entre 8 et 16 ans des listes de mots isolés. Dans ces listes, la moitié des mots était lisible par simple conversion grapho-phonémique (mots réguliers), les autres ne pouvaient être lus de la sorte (mots irréguliers). Les normo-lecteurs devaient en outre pouvoir écrire au moins la moitié des mots qu'ils étaient capables de lire immédiatement (mots appartenant à leur vocabulaire « visuel »). De plus, ils devaient pouvoir retranscrire de manière phonologiquement acceptable les mots réguliers ne faisant pas partie de leur vocabulaire visuel. Boder a distingué trois sous-groupes de dyslexiques d'après les résultats de cette étude : les dysphonétiques qui éprouvaient des difficultés à lire des mots réguliers, non connus ou des pseudo-mots (65% de l'échantillon), les dyséidétiques qui présentaient des difficultés pour lire les mots irréguliers (10% de l'échantillon) et les « mixtes » avec des difficultés sur les deux types d'items (25% de l'échantillon). L'étude qui reste probablement la plus marquante dans les tentatives de typologie est celle de Castles et Coltheart [48]. Ils ont procédé à une classification inspirée de cas dissociés de dyslexie acquise chez l'adulte. Le protocole et la classification qui en découle sont basés sur les modèles de lecture chez l'adulte qui opposent les voies lexicale et sublexicale. Dans une première expérience 56 dyslexiques et 56 normo-lecteurs appariés en âge étaient soumis à la lecture d'une liste de mots irréguliers pour tester la voie lexicale, une liste de pseudo-mots pour tester la voie sublexicale et une liste de mots réguliers pour comparer avec les mots irréguliers. Selon leur hypothèse, il y aurait un groupe de dyslexiques phonologiques (P-Dys ci-après) et un groupe de dyslexiques de surface (S-Dys ci-après), mais leurs résultats tendraient à montrer qu'un groupe

présente des difficultés avec la conversion grapho-phonémique, et un autre présente des difficultés de reconnaissance globale des mots. Il y aurait donc 30% de dyslexiques de surface (S-Dys), 55% de dyslexiques phonologiques (P-Dys), et 6% de dyslexiques mixtes, le reste de l'échantillon ne présentant pas de déficit. À partir de ces résultats, les auteurs postulent qu'il n'existerait finalement qu'un seul type de dyslexie de développement (touchant la conversion grapho-phonémique) et que l'autre groupe présenterait un autre trouble non spécifique au langage (trouble de reconnaissance globale). Pour tenter de mieux comprendre ce deuxième trouble d'apparence « non linguistique », ils ont conduit une deuxième expérience qui inclut 20 dyslexiques. Ils devaient lire 30 mots réguliers et 30 mots irréguliers puis la compréhension de ces items était testée. Ils formulèrent l'hypothèse que si la compréhension pose problème comme la lecture, c'est qu'il s'agit d'un trouble général et non spécifique à la voie lexicale. Cette expérience montre que le groupe qui posait problème (celui qui présente un trouble de reconnaissance globale) lit significativement moins bien les mots irréguliers que les mots réguliers. Pourtant, il n'y a pas de différence significative en compréhension. Cela prouve que ces sujets ne souffrent pas d'un déficit général et qu'il y a bien une double dissociation entre les difficultés liées à la procédure lexicale et les déficits liés à la procédure sublexicale. Néanmoins, Stanovitch remet en question le fait qu'un groupe d'enfants normo-lecteurs du même âge de lecture constitue la meilleure base de comparaison [294].

Une seconde étude, dans la lignée de celle que je viens de décrire a ajouté la comparaison des enfants dyslexiques avec des enfants du même âge de lecture [180]. Les auteurs retrouvent les sous-groupes P-Dys et S-Dys avec une distribution de 33% de P-Dys, 29% de S-Dys, 10% de dyslexiques mixtes et 28% d'enfants ne présentant pas de déficit particulier. Cependant, par rapport aux enfants du même âge, les dyslexiques lisent dans l'ensemble moins bien les pseudo-mots et les mots irréguliers. Les S-Dys ont des performances sensiblement similaires à celles des lecteurs de même âge de lecture ce qui n'est pas le cas des P-Dys. Cela pose le problème de la différence entre déviance (P-Dys) et retard d'apprentissage (S-Dys). De plus, les P-Dys présentent des difficultés spécifiques dans l'épreuve métaphonologique, et les S-Dys présentent des difficultés dans la tâche de choix orthographique. Pour expliquer cela, les auteurs ont choisi de se référer au modèle connexionniste de Seidenberg et MacClelland [258]. Le groupe P-Dys aurait un déficit au niveau de la représentation phonologique et le groupe S-Dys aurait des connexions plus limitées entre tous les modules, soit un déficit global « d'activation ».

Sprenger-Charolles et al. ont reproduit la méthodologie Castles et Coltheart afin d'étudier la distribution dans les sous-groupes de P-Dys, de S-Dys et de dyslexiques mixtes chez des apprentis de la langue Française [290]. Le groupe comprenait 31 enfants dyslexiques de 10 ans comparés à deux groupes de normo-lecteurs : un de même âge et un de même âge de lecture (8 ans environ). La classification a été faite à partir des temps de lecture de pseudo-mots et de mots irréguliers (avec le modèle de lecture à double voie comme base). Ces épreuves font ressortir 16 P-Dys et 10 S-Dys. Mais la majorité des enfants présente des difficultés dans les deux tâches. Les mêmes enfants ont été soumis à une dictée de mots irréguliers et de pseudo-mots pour vérifier leurs compétences orthographique et phonologique. La précision des

réponses en lecture a également été prise en compte en plus de la rapidité utilisée pour la classification. Les résultats à ces épreuves ont montré qu'en orthographe, les compétences des enfants dyslexiques étaient proches de celles des enfants du même âge de lecture (reprenant l'idée de retard évoquée plus haut). Cependant, les deux groupes sont déficitaires en phonologie pour la vitesse de réponse chez les P-Dys et pour la précision chez les S-Dys. De plus, d'autres tests (en mémoire à court terme et métaphonologie) montrent qu'il existe un trouble phonologique général dans les deux groupes. En conclusion, Sprenger-Charolles et al. postulent que le seul trouble phonologique pourrait être à l'origine de la dyslexie de développement et que les deux types correspondraient plutôt à des stratégies compensatoires différentes [290].

Autres éléments de classification

Les études citées ci-dessus s'appuient sur des modèles de la lecture chez l'adulte. Morris et al. [196] ont voulu prendre en compte tous les domaines dans lesquels les enfants dyslexiques pouvaient avoir des difficultés : le langage, la mémoire de travail et les compétences cognitives générales. Ils partent du principe que le trouble phonologique est central dans la dyslexie de développement et leurs hypothèses concernant les sous-types impliquent trois types. Un premier type dit « phonological awareness » correspondrait aux dyslexiques ne présentant que des troubles de la conscience phonologique. Le second dit « phonology-verbal short-term memory » concerne les enfants qui présentent des difficultés dans certains aspects phonologiques du langage, la dénomination, les habiletés morphologiques et la mémoire à court terme. Enfin, le dernier groupe dit « general cognitive » aurait des difficultés dans tous les domaines du langage et dans toutes les capacités cognitives. Pour cette analyse, 232 enfants ont passé une batterie de tests métaphonologiques, de langage, de mémoire, ainsi que des tests concernant différentes capacités cognitives. Les auteurs ont ainsi pu grâce à des analyses statistiques définir 7 sous-groupes de dyslexiques. Parmi ces groupes, deux présentaient des difficultés en langage écrit et langage oral. Quatre des cinq groupes présentant un trouble spécifique du langage écrit se distinguaient par une conscience phonologique déficiente (ces groupes varient entre eux en fonction de leurs compétences en dénomination rapide et mémoire à court terme verbale). Le dernier groupe présentait un déficit en temps de traitement verbal et non verbal (en particulier en lecture).

Ces études ne s'intéressent qu'aux langues alphabétiques pour lesquelles les modèles à deux voies ont été développés. Qu'en est-il des enfants présentant un trouble de la lecture dans une langue non alphabétique ? Une équipe de Hong-Kong a cherché à établir des sous-types de dyslexie chez les enfants chinois [126]. En Chinois, les idéogrammes sont composés d'un radical sémantique et d'un radical phonétique. En fait, pour lire, le lecteur chinois ne se sert en général que du radical sémantique. L'apprentissage de la lecture en Chine passe par une étape de « déchiffrage » qui consiste en un repérage d'indices permettant la lecture de nouveaux caractères, puis l'apprenti lecteur passe directement à un stade orthographique pendant lequel il construit des représentations orthographiques. Ho et al. [126] mentionnent le fait que malgré l'apparence purement orthographique de la lecture en

chinois, les enfants dyslexiques sont moins bons que la moyenne en suppression phonémique, et ce, qu'ils aient commencé à apprendre à lire à l'aide du pin yin (alphabet chinois) ou non (comme c'est le cas à Hong-Kong). Pour établir des sous-types, cette équipe a soumis 147 enfants dyslexiques chinois à différentes épreuves de lecture ainsi qu'à des tâches mettant en jeu les capacités cognitives. Leurs résultats montrent qu'il existerait sept sous-types de dyslexie : « déficit global », « orthographique », « mémoire phonologique », « mixte », et trois types en lien avec des difficultés de dénomination rapide. Les deux troubles prédominants concernent l'orthographe et la dénomination rapide, qui participeraient majoritairement à la construction des représentations orthographiques en chinois.

Il est en fait difficile d'établir des catégories précises en matière de dyslexie. Dans les études réalisées sur le sujet, de nombreuses variables peuvent faire changer les proportions des différents types de dyslexie. Sprenger-Charolles et Serniclaes [289], ont en effet observé que les résultats varient selon l'âge des enfants recrutés, selon leur langue maternelle ou encore selon les variables dépendantes du protocole (temps de latence en lecture, nombre de bonnes réponses, types d'erreur. . .).

1.2.3 *Les troubles associés*

La dyslexie de développement n'est que rarement isolée, d'un point de vue théorique on peut noter plusieurs caractéristiques additionnelles de la dyslexie. Le déficit de lecture est persistant mais peut prendre une expression phénotypique variable au cours du développement ; elle fait souvent partie d'un syndrome comportemental plus global et est souvent trouvée avec d'autres comorbidités [111]. La dyslexie de développement est donc intégrée dans ce que les chercheurs appellent aujourd'hui les syndromes « dys » qui concernent les dysfonctionnements des apprentissages. D'après une étude épidémiologique [115] portant sur 177 enfants avec un diagnostic principal de dyslexie de développement, 90% présentent des troubles associés. La dyslexie, à partir du moment où le niveau orthographique en production écrite peut être mesuré, est de façon quasi-systématique associée à une dysorthographe. Il s'agit d'un trouble de l'apprentissage de l'orthographe qui peut affecter, à divers degrés : l'orthographe d'usage qui est la forme spécifique de chaque mot (par exemple, on écrit bien « crapaud » et non « crapeau » ou encore « éléphant » et non « éléfant ») ; l'orthographe phonétique qui reflète la capacité à utiliser efficacement les règles de conversions phonème-graphème (seule utilisée pour écrire des mots inconnus en période d'apprentissage) ; l'orthographe grammaticale, c'est-à-dire la transcription des morphèmes flexionnels (eg. le pluriel des noms ou le temps des verbes). Ensuite, il est possible que l'enfant dyslexique présente également un Trouble du Langage Oral (TLO). Il peut porter sur l'expression et/ou la compréhension et peut affecter l'encodage phonologique, syntaxique, sémantique. . . La sévérité du TLO peut être à l'origine d'un retard de lecture (dans plus de la moitié des cas [30, 334]). C'est pourquoi il est difficile de parler de trouble associé à la dyslexie quand celle-ci n'est plus seulement un trouble spécifique du langage écrit. Néanmoins, Bishop et Snowling [30] défendent l'idée d'un trouble commun ("Specific Language Impairment") qui aurait une origine phonologique et qui pourrait avoir pour conséquence des difficultés à la fois dans l'apprentissage du langage oral et du langage

écrit. Parmi les autres syndromes « dys », peuvent également être associés à la dyslexie de développement : la dyscalculie (ou troubles des apprentissages mathématiques) dont la prévalence chez les enfants dyslexiques est très variable en fonction des études (second trouble associé pour Habib [115] alors qu'aucun cas n'est reporté dans l'étude épidémiologique de Cuvellier et al. [134]); la dysgraphie qui est un trouble de l'exécution du geste d'écriture ; le Trouble Déficit de l'Attention avec Hyperactivité (TDAH) (dont la prévalence serait de 25% dans les troubles de la lecture [259]) ; la dyspraxie qui est un trouble de la coordination motrice [52] ; la dyschronie, trouble de l'organisation temporelle. . .

Parmi les autres compétences souvent déficitaires dans les syndromes « dys » se trouvent les composantes suivantes de la mémoire de travail :

- La boucle phonologique. Ce système sert à garder une trace mnésique d'unités phonologiques pendant une période ne dépassant pas 30 secondes. Cette capacité de rétention est très importante quand l'enfant apprend à parler. Selon Baddeley [11], la boucle phonologique ne serait utilisée en lecture que lorsque la mémoire visuo-spatiale serait saturée ou dans le cadre de la conversion grapho-phonologique. Or, au début de l'apprentissage et chez des enfants dyslexiques, la lecture se fait principalement par ce biais. Le recodage articulatoire de l'information phonologique à retenir, permettant un « rafraîchissement » de l'information, joue probablement un grand rôle à cet égard bien qu'il puisse aussi être à l'origine d'erreurs se cumulant avec les erreurs phonologiques chez le sujet dyslexique. La réinterprétation des données impliquant un trouble de la représentation phonologique comme à l'origine de nombreux cas de dyslexie, vers un trouble de la mémoire de travail phonologique sera discutée plus bas [76, 233].
- La mémoire visuo-spatiale appelée également « calepin visuo-spatial ». Cette mémoire permet le stockage d'éléments visuels (formes, couleur. . .) pendant une dizaine de secondes. Ce stockage peut être affecté chez des dyslexiques présentant des troubles visuo-attentionnels (cf. ci-après troubles de l'empan visuo-attentionnel).

Les signes associés au trouble de la lecture sont particulièrement variables, tant qualitativement que quantitativement, selon le type de dyslexie. Si l'on s'en tient à la classification développée ci-dessus en dyslexies phonologique, de surface ou mixte, on remarque que les troubles de type dyspraxie, dysgraphie, sont souvent associés aux formes à composante visuelle de surface ou mixte. Cependant, les données de Chaix et al. [52] suggèrent chez des enfants dyslexiques de type phonologique l'absence de lien causal entre troubles de la lecture, trouble de l'attention et troubles dyspraxiques, en dépit d'une co-morbidité importante. Dans ce cas, on note que la sévérité de la dyslexie n'est pas proportionnelle à l'intensité du trouble phonologique, ce dernier pouvant être absent, mais plutôt à l'intensité des troubles de type sensori-moteur, avec au premier chef les troubles du graphisme et de la représentation spatiale (dyspraxie visuo-constructive). A l'inverse, des antécédents ou des signes persistants de troubles du langage oral sont beaucoup plus souvent associés (bien que non exclusivement) à des dyslexies de type phonologique [48, 180]. Plus récemment, Facoetti et al. avancent qu'un faible niveau en lecture de pseudo-mots est associé à des troubles de l'attention visuelle [86].

1.3 HYPOTHÈSES SUR LES DÉFICITS COGNITIFS À L'ORIGINE DE LA DYSLEXIE

Nous avons décrit les manifestations directement visibles de la dyslexie de développement, à savoir la caractérisation des troubles de la lecture ainsi que les autres déficits associés. Passons à présent à l'étude des hypothèses sur les troubles sous-jacents qui expliqueraient les problèmes de lecture observés en « surface ». Parmi les tendances actuelles dans le débat sur les origines de la dyslexie, deux s'affrontent : l'une considère que la dyslexie est un trouble spécifique au langage (traitement de haut niveau), l'autre la voit comme un syndrome aux manifestations multiples, aux niveaux sensoriels et moteurs notamment (traitement de bas niveau). Je vais développer ici quelques-unes des compétences qui peuvent être mises en cause dans la dyslexie développementale, à savoir, les troubles de la représentation phonologique, les troubles de la perception auditive, de la perception visuelle (hypothèse magnocellulaire) et enfin, les troubles cérébelleux.

1.3.1 *Un déficit phonologique prépondérant*

L'hypothèse qui rassemble le plus de scientifiques à l'heure actuelle dans l'étude de la dyslexie est celle d'un déficit des représentations phonologiques. En effet, les études de groupe portant sur la dyslexie de développement ont permis de relever de façon consistante la présence de troubles de la manipulation des phonèmes [283].

Les déficits phonologiques dans la dyslexie de développement

De nombreux travaux ont montré que des enfants présentant un retard de lecture avaient également des difficultés par rapport à leur pairs pour des tâches impliquant la phonologie : manipulation de phonèmes, mise en correspondance sons/lettres, mémoire verbale, lecture automatique rapide [33, 293, 335, 323]. En effet, selon l'hypothèse phonologique, les enfants dyslexiques auraient un déficit dans les représentations phonologiques qui aurait pour conséquence d'importantes difficultés en conscience phonologique et pour la mise en correspondance graphème-phonème [80, 158, 159, 284, 292, 334]. De plus, toutes les études qui ont examiné à la fois l'hypothèse phonologique et les hypothèses alternatives signalent que les dyslexiques souffrent d'un déficit phonologique, mais pas forcément d'un déficit auditif, visuel ou moteur [54, 143, 215, 234, 235, 246, 256, 257, 264, 344, 346, 345]. D'autres études indiquent que les dyslexiques ayant des troubles visuels ont également des déficits phonologiques [40, 41, 51, 281]. Par exemple, dans une étude longitudinale, un groupe de 20 dyslexiques a été suivi depuis les toutes premières étapes de l'apprentissage de la lecture jusqu'à l'âge de 14 ans [143]. Ils ont été soumis à une large batterie de tests phonologiques, ainsi que visuels et auditifs. Quand on prend en compte les performances du groupe de dyslexiques dans son ensemble, le déficit commun concerne uniquement différentes tâches phonologiques : répétition de pseudo-mots, analyse et mémoire phonologique, c'est-à-dire des épreuves impliquant la mémoire de travail phonologique. Il semblerait également que des dyslexiques aient des performances anormales dans des tâches de perception catégorielle. En effet, ils seraient capables de faire la distinction entre deux variants

appartenant à la même catégorie phonémique mais distingueraient difficilement deux variants appartenant à deux catégories différentes [261].

Conséquences pour l'apprentissage de la lecture

Comme décrit plus haut, le développement des capacités métaphonologiques et l'apprentissage de la lecture sont hautement interdépendants [49]. La théorie phonologique « classique » explique les difficultés sévères rencontrées par les dyslexiques en lecture de mots nouveaux par la faiblesse de leurs habiletés phonologiques en dehors de la lecture, entre autres, en analyse phonémique et en mémoire à court terme phonologique. Des déficits dans ces domaines peuvent entraver la mise en place du décodage étant donné qu'il faut, pour utiliser cette procédure, mettre d'abord en correspondance les unités sublexicales de l'écrit, les graphèmes, avec les unités correspondantes de l'oral, les phonèmes. Il faut ensuite assembler ces unités pour accéder aux mots. La première opération nécessite des habiletés d'analyse phonémique, la seconde implique la mémoire phonologique à court terme. Un enfant incapable d'extraire les phonèmes et souffrant en plus d'un déficit mnésique va difficilement pouvoir utiliser le décodage [160, 181, 186, 255].

Manifestation des troubles de la conscience phonologique en lecture dans la dyslexie

Le moyen le plus classique de tester ces troubles, en lecture, consiste en la lecture de pseudo-mots. Leur lecture implique nécessairement l'utilisation de la procédure alphabétique. Ainsi, elle est déficitaire quand la conversion grapho-phonémique est inefficace. Les difficultés dépendent aussi de la structure consonantique des pseudo-mots. Quand il s'agit de mots construits sur une succession de CV (Consonne/Voyelle) non ambiguës (pour lesquelles une lettre correspond à un seul phonème), par exemple « bikado » ou « ratipé », la lecture pose moins de problème pour l'enfant dyslexique. Mais si le logatome est construit avec des trigrammes, des groupes consonantiques ou vocaliques complexes, des lettres « muettes » (voyelles nasales : « on », « an » ...) ou encore des consonnes dont la prononciation dépend de règles complexes (g, c, s), alors, la lecture devient vraiment déficitaire chez le dyslexique. Les fautes les plus typiques sont des erreurs de conversion grapho-phonémique quand cette conversion nécessite l'usage de règles précises ; des erreurs d'ordonnement, en particulier des inversions (l'enfant cherche souvent dans ce cas à « casser » les groupes consonantiques difficilement prononçables pour les ramener à des structures CV, par exemple « pra » lu /par/). Chez certains dyslexiques les troubles phonologiques pouvaient déjà se faire sentir au niveau du développement du langage oral, certains auteurs évoquent même l'hypothèse d'un trouble phonologique qui serait commun aux troubles de l'apprentissage du langage en général avec, sur un continuum, troubles du langage oral et écrit. Ici, il ne s'agit plus seulement d'un déficit de la conscience phonologique (manipulation des phonèmes) mais d'un déficit plus profond des représentations phonologiques. Les troubles de la conscience phonologique ne sont donc pas stéréotypés mais présentent une certaine variabilité interindividuelle.

La prévalence des troubles de la conscience phonologique

Des études ont été réalisées pour évaluer la proportion de sujets dyslexiques atteints par des troubles phonologiques. Ramus et al. [234] ont soumis une batterie de tests à des enfants dyslexiques (lecture de pseudo-mots, analyse phonologique, fluence verbale et dénomination rapide). Les résultats ont montré que 77% des enfants de l'étude avaient un déficit phonologique. Et pourtant, ces enfants suivaient un enseignement spécialisé pour les dyslexiques avec un entraînement de la conscience phonologique. Les résultats ne sont pas tous aussi flagrants dans d'autres études. Ainsi, dans l'étude de White et al. [344], la prévalence des troubles sensori-moteurs et linguistiques a été évaluée dans une cohorte d'enfants dyslexiques. 12 enfants sur 23 présentaient un déficit phonologique. Mais ils n'ont pas inclus la lecture de pseudo-mots comme variable phonologique. De plus ils ont choisi un seuil de -1.65 écart-type comme critère en deçà duquel le déficit était confirmé, contre seulement -1 écart-type pour Ramus et al. Ces différences méthodologiques peuvent expliquer la différence de résultats. Néanmoins, la présence d'un déficit de la conscience phonologique et de la lecture de pseudo-mots reste majoritaire par rapport à l'occurrence d'autres déficits. Si la communauté scientifique semble s'accorder sur le fait que ces troubles sont partagés par la majorité des dyslexiques, tous ne reconnaissent pas la dyslexie comme une pathologie qui trouverait son origine dans un trouble qui affecterait uniquement les représentations phonologiques. Récemment, Ramus et Szenkovits ont proposé une réinterprétation des données issues des études portant sur le trouble des représentations phonologiques [233]. Changeant d'opinion par rapport à leurs travaux précédents [235], ils concèdent, après d'autres [76], que les déficits observés relèveraient en fait d'un trouble de la mémoire de travail phonologique (systématiquement impliquée dans les tâches dites de conscience phonémique, d'autant plus qu'elles consistent en la manipulation de plusieurs phonèmes dans des segments assez longs, par exemple une tâche de contrepèterie impliquant plusieurs syllabes/-mots : « L'art des mots »).

1.3.2 L'hypothèse des troubles du traitement des informations auditives

Selon certains auteurs, il faudrait considérer le déficit phonologique comme concernant le domaine auditif en général [148, 307]. L'hypothèse « auditive » a été développée depuis longtemps en parallèle de l'hypothèse phonologique. Nous allons ici aborder cette hypothèse d'un trouble du traitement acoustique, notamment des transitions temporelles rapides. Dans une deuxième section je décrirai une hypothèse alternative plus récente, à l'interface entre hypothèse auditive et phonologique, d'un trouble de la perception catégorielle des stimuli linguistiques.

Trouble du jugement d'ordre temporel

Selon Paula Tallal [307], il existerait un déficit dans la résolution temporelle du système auditif, qui affecterait la perception des sons brefs et des transitions temporelles rapides. Le cerveau de l'enfant dyslexique se montrerait fondamentalement incapable de traiter des stimuli caractérisés par des variations rapides. Or de tels éléments sont cruciaux dans la parole, car ils permettent de différencier de nombreux

phonèmes. Par exemple, les sons /b/ et /d/ diffèrent par une transition spectrale durant seulement 40 ms. Il sera alors très difficile pour un sujet dyslexique de faire la différence entre les deux mots « bon » et « don » par exemple, à cause du caractère flou des frontières catégorielles. L'hypothèse est qu'un déficit auditif assez général, de bas niveau, serait à la base du déficit phonologique. Tallal et Piercy ont ainsi fait apparaître que des enfants présentant des troubles de l'apprentissage du langage (LLI ou Language Learning Impairment) éprouvent davantage de difficultés que des enfants témoins du même âge lorsqu'il leur est demandé de différencier et de reproduire l'ordre dans lequel se succèdent deux sons non-verbaux [307]. Selon eux, les problèmes de ces enfants proviendraient ainsi de leur incapacité à percevoir les variations rapides dans le signal de parole, et en particulier les transitions de formant, dont la durée peut ne pas dépasser quelques dizaines de millisecondes. L'une des expériences de ces auteurs [307] consiste à faire écouter à l'enfant dyslexique des tons purs de deux fréquences différentes. Il doit appuyer sur la touche 1 du clavier lorsque le son est haut et sur la touche 2 lorsque le son est bas. Puis lui sont présentées des paires de sons (bas-bas, bas-haut, haut-bas, haut-haut) et l'enfant doit appuyer successivement sur les deux touches correspondant aux deux sons de la paire, de la même manière que précédemment (1-1, 1-2, 2-1, 2-2). Tallal a montré que les enfants dyslexiques éprouvent de grandes difficultés dans l'exécution de cette tâche, notamment lorsque les tons sont courts et rapprochés, suggérant ainsi l'hypothèse d'un traitement auditif déficitaire de ces paires d'items brefs en succession rapide. Cette hypothèse a néanmoins été critiquée, notamment du fait que :

1. Seuls 39% des dyslexiques semblent être affectés par un tel problème [232].
2. Les troubles ont été décrits chez des enfants qui présentent, en plus des déficits de lecture, un trouble de l'apprentissage plus généralisé.
3. Ces troubles de traitement « temporel » seraient en fait liés à la difficulté de discrimination phonologique des paires opposées par le lieu d'articulation alors qu'on observe pas de troubles pour des paires plus aisées à discriminer (occlusive versus sifflante) [193, 234].
4. Il est parfois difficile de reproduire certains de ces résultats [193] ou de conclure que seule la détection des transitions rapides est affectée [8].
5. Il semblerait que les performances en tâche de discrimination temporelle auditive n'aient pas d'implication directe dans la perception de la parole [246, 303].

Cependant, dans une étude visant à faire la part entre trouble de perception auditive (niveau acoustique) et trouble phonologique, Rey et al. ont étudié chez des enfants dyslexiques l'effet du ralentissement et de la complexité phonologique des stimuli linguistiques [237]. Dans la tâche de jugement d'ordre temporel les sujets dyslexiques ainsi que des contrôles appariés en âge, devaient trouver l'ordre d'apparition de consonnes dans un stimulus. Les dyslexiques montraient des performances moindres que celles de normo-lecteurs pour des stimuli en parole normale alors que le ralentissement de la parole entraînait une normalisation des performances. En revanche, la modulation de la

complexité phonologique (structure consonantique) n'affectait pas les performances.

Trouble de la perception catégorielle

L'analyse phonémique de mots implique une représentation selon une suite de phonèmes. Cette représentation diffère d'une langue à l'autre et nécessite donc un apprentissage implicite qui correspond à un processus de catégorisation perceptive. La catégorisation correspond à l'ordonnancement que nous faisons des informations disponibles dans les éléments du monde environnant selon des critères particuliers. En ce qui concerne la catégorisation des sons du langage, il peut s'agir du lieu d'articulation, du caractère voisé ou non, etc. . . Selon certains chercheurs, un trouble de la catégorisation des phonèmes serait à l'origine des problèmes des enfants dyslexiques.

– Qu'est-ce que la catégorisation phonémique ?

Les sons du langage diffèrent entre eux selon leur lieu d'articulation (par exemple /p/ vs. /t/), leur mode d'articulation (/t/ vs. /s/), leur caractère voisé ou non -vibration ou non des cordes vocales- (/p/ vs. /b/), leur caractère oral ou nasal (/d/ vs. /n/). Ces différences, au niveau acoustique, se font grâce à des indices très fins qui ont pu être étudiés grâce à l'apparition des premiers synthétiseurs vocaux [157]. Grâce à cela, les hypothèses élaborées à partir des spectrogrammes (représentation des sons selon la fréquence et le temps) ont pu être vérifiées. Par exemple, nous pouvons différencier le /p/ du /b/, grâce au Voice Onset Time (VOT), c'est à dire le temps qui s'écoule entre la fin de l'occlusion de la consonne et le début du voisement du phonème qui lui succède. Ce VOT dure environ 30 ms. Sur la figure 2 nous pouvons voir comment un sujet adulte sans trouble perceptif identifie le son /ma/. En fait, une série de syllabes allant, sur un continuum, du /ma/ vers le /na/ (seul le lieu d'articulation diffère) est présentée au sujet qui doit dire s'il perçoit un /ma/ ou un /na/. Il y a une phase critique au cours de laquelle le sujet n'identifie plus du tout le /ma/ au profit du /na/. La perception du sujet a changé de catégorie. Il s'agit là de catégorie phonémique.

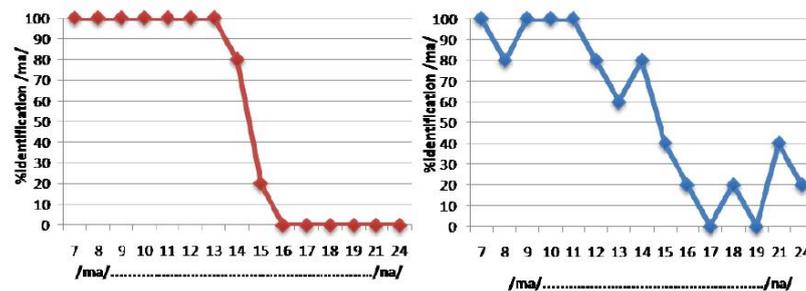


FIG. 2: Test de perception catégorielle chez un adulte normo-lecteur (à gauche) et chez un enfant dyslexique (à droite)

– Perception catégorielle et dyslexie :

La relation entre perception catégorielle et dyslexie est explorée depuis quelques années dans plusieurs travaux [260, 261, 262]. Ils ont montré pour la plupart que les dyslexiques catégorisent moins ou établissent des frontières plus floues que les normo-lecteurs. Par

exemple, pour des stimuli très proches de /na/ l'enfant continue à percevoir jusqu'à 40% des stimuli comme étant des /ma/. Ce déficit chez les dyslexiques se caractérise par une moins bonne discriminabilité des différences entre catégories, et par une meilleure discriminabilité des différences intra-catégorielles comme le montre l'étude de Serniclaes et al. [261] au sein de laquelle les sujets écoutaient deux variants de /ba/ et deux variants de /da/, la différence acoustique entre ces variants intra-catégoriels étant de même amplitude que celle entre la paire inter-catégorielle /ba/ et /da/. Cette difficulté à catégoriser entraînerait des problèmes pour la mise en place de la procédure sublexicale lors de l'apprentissage de la lecture. Etant donné que les sujets n'arrivent pas à avoir de représentation stable des différents phonèmes et qu'il multiplie les représentations d'un seul phonème (plusieurs allophones, qui correspondraient donc à des phonèmes pour l'enfant dyslexique), la conversion grapho-phonémique devient encore plus difficile, même pour des graphèmes qui ne correspondent d'habitude qu'à un seul phonème.

Les défenseurs d'un trouble auditif putatif s'appuient sur des expériences montrant que les troubles de perception catégorielle des dyslexiques ne seraient pas spécifiques au domaine linguistique : ils seraient seulement la conséquence d'une incapacité à réaliser une analyse fine des caractéristiques physiques du son, empêchant ainsi l'extraction correcte de la séquence phonémique correspondante.

Un trouble phonologique ou acoustique ? Une question découle directement de ces résultats : le trouble de la perception catégorielle est-il spécifique au langage ou s'agit-il d'un trouble plus général, qui toucherait la perception acoustique ?

Dans la même étude, Serniclaes et al. [261] ont soumis les sujets à différents types de stimuli. Une partie des stimuli étaient des stimuli de langage tels que décrits ci-dessus. L'autre partie des stimuli était modifiée acoustiquement par rapport aux premiers : la fréquence fondamentale en était enlevée. Ainsi, les sujets ne pouvaient la percevoir ou la considérer comme de la parole. Ils apparaissent comme du bruit (une sorte de sifflement). Les résultats obtenus dans ces conditions ont montré que les dyslexiques étaient toujours déficitaires pour la catégorisation de sons qui ne sont pas de la parole, mais les caractéristiques des performances (frontières de catégorisation) ne sont pas les mêmes que pour les sons de la parole. Le déficit serait donc double mais différent en fonction de la nature des sons perçus [261].

Les théories considérant un trouble phonologique ou perceptif spécifique au langage comme étant à l'origine des dyslexies, sont largement reconnues et admises. Mais elles connaissent aussi des limites puisqu'elles n'expliquent pas tous les types de dyslexies et tous les types de troubles, notamment les troubles d'ordre visuo-spatial qui existent chez certains dyslexiques.

1.3.3 *Troubles visuels*

Pringle Morgan avait identifié la dyslexie comme une cécité congénitale pour lire. Depuis, de nombreuses observations cliniques chez des sujets dyslexiques ont attiré l'attention sur un possible déficit du

traitement perceptif visuel à l'origine de cette pathologie. La dyslexie pourrait être due à un défaut du sous-système magnocellulaire, le système de vision du mouvement, qui aurait pour conséquence un déficit dans le traitement de la perception visuelle fine et par extension, de l'attention visuelle.

Déficit du système magnocellulaire

- Les systèmes magnocellulaire et parvocellulaire :
Les systèmes magnocellulaire et parvocellulaire correspondent en fait aux deux couches de cellules situées au niveau du corps géniculé latéral (lien entre le tractus optique et l'aire visuelle primaire du cortex occipital). Il s'agit de deux systèmes fonctionnels opposés. Le système parvocellulaire (ou système continu) est sensible à la haute fréquence spatiale (résolution des détails), à la longueur d'onde (la couleur), aux hauts contrastes de luminosité, aux stimuli continus, immobiles ou en déplacement lent. Ses neurones ont une réponse lente, qui se maintient tant que dure le stimulus. Le système magnocellulaire (ou système transitoire) est sensible aux variations temporelles rapides des stimuli (stimulus transitoire, clignotant ou en mouvement), aux basses fréquences spatiales (il perçoit la silhouette générale plutôt que les détails), au faible contraste de luminosité des stimuli, et il est insensible à la longueur d'onde. Ses neurones ont une réponse rapide et brève, au moment de la survenue abrupte du stimulus, mais aussi de sa disparition brusque. Ce système implique des cellules avec un grand champ récepteur et un gros soma situées dans les corps genouillés latéraux [140]. Pour la lecture, le système parvocellulaire gère les informations prises lors de la fixation oculaire. Le système magnocellulaire est activé lors de la saccade par le mouvement apparent de l'image. Son activation aurait un effet inhibiteur sur le système parvocellulaire empêchant ainsi l'effet de défilement ou de travelling rétinien et favorisant le traitement de nouvelles informations par « sauts » successifs. Lorsque l'on regarde un objet, chaque œil étant dirigé vers cet objet, on parle de fixation binoculaire. Mais les yeux ne sont pas complètement fixes et tout mouvement involontaire est corrigé en partie par un rétrocontrôle (ou « feedback ») sensori-moteur, appelé le contrôle oculomoteur, impliquant la voie magnocellulaire et permettant de maintenir la stabilité du regard [140].
- Trouble du système magnocellulaire et dyslexie :
L'hypothèse magnocellulaire suppose que pendant la lecture, le système magnocellulaire ne peut inhiber, lors de la saccade, l'image « créée » par le système parvocellulaire lors de la fixation précédente. Il se produit ainsi un « brouillage » qui compromet la reconnaissance des lettres et des mots. Cela expliquerait des erreurs de type inversions de lettres (« pal » lu /pla/) ou de substitutions de lettres formellement proches (confusion entre « b » et « d », « p » et « q » ...). Cette hypothèse est corroborée par plusieurs types d'études. Premièrement, au niveau neuroanatomique, les études de Galaburda et collaborateurs ont mis en évidence chez quelques cas de dyslexie que les neurones magnocellulaires des corps genouillés latéraux sont en nombre réduit et possèdent des somas de taille réduite [96]. Deuxièmement, au niveau psychophysique, les dyslexiques ont des performances plus faibles

que les normo-lecteurs dans la détection des basses fréquences spatiales et hautes fréquences temporelles. Dans des expériences de Random Dot Kinetogram (RDK)⁵, les dyslexiques ont un seuil de perception d'un mouvement cohérent plus élevé que la normale ce qui semble être en faveur d'un déficit magnocellulaire. Enfin, ces mêmes expériences de RDK réalisées en imagerie fonctionnelle, tendent à montrer une activation anormale de l'aire corticale médiane temporale (aussi appelée V5) spécifique au traitement du mouvement et censée recevoir des informations principalement issues de la voie magnocellulaire [297, 295].

Dans une reformulation plus récente, Stein a avancé une théorie qui permettrait d'expliquer la majorité des troubles des dyslexiques. Selon lui, les dyslexiques seraient déficitaires dans l'ensemble des systèmes magnocellulaires. Un problème métabolique d'origine génétique entraînerait une mauvaise gestion des acides gras insaturés nécessaires au bon fonctionnement des neurones magnocellulaires. Un dysfonctionnement de la voie magnocellulaire du corps genouillé médian, impliquée dans l'audition, permettrait d'expliquer le déficit de traitement temporel rapide des dyslexiques. Au final, cet ensemble de problèmes sensori-moteurs se répercuterait au niveau cognitif et il en résulterait des problèmes phonologiques [296]. Cette hypothèse théorique a été émise d'après l'observation d'anomalies histologiques au sein des corps genouillés médians [97], en plus d'un taux de phospholipase A2 anormalement élevé chez les dyslexiques [314].

Cette théorie, bien qu'impressionnante de par l'étendue des domaines qu'elle couvre, et attrayante par la chaîne causale qu'elle propose, allant ainsi du gène jusqu'au comportement, ne rend toutefois pas compte de l'ensemble des données existantes. Il faut en effet noter que les modèles animaux suggèrent que les lésions corticales périsylviennes seraient la cause et non la conséquence des lésions thalamiques [95, 232].

De plus une controverse existe quant à la validité des études de sensibilité au contraste visuel. Or celles-ci constituent l'un des principaux arguments expérimentaux avancés par les tenants de l'hypothèse magnocellulaire pour étayer l'idée d'un déficit de ce système dans la dyslexie. Ainsi, selon Skottun, ces études ne montrent pas l'existence d'un déficit du système magnocellulaire mais plutôt du système parvocellulaire. Seule une citation sélective de la littérature peut permettre de donner l'impression de l'existence d'un déficit magnocellulaire chez les dyslexiques. Ce chercheur soutient aussi que de toute façon, ni les stimuli utilisés dans les études de contraste, ni ceux utilisés dans les expériences de RDK ne sont appropriés pour tester les composants magnocellulaires du système visuel [277, 278, 279, 280].

5 Le RDK est un stimulus psychophysique standard utilisé pour étudier les propriétés des détecteurs de mouvements lents. Un pattern dense de points blancs et noirs est déplacé de manière cohérente dans une direction ou à l'opposé (par exemple à gauche et à droite) et le sujet doit donner la direction qu'il aperçoit. Le mouvement des points peut également être incohérent.

Trouble visuo-attentionnel

De nouvelles hypothèses plus récentes évoquent chez les dyslexiques, un déficit de l'attention visuelle, décrit à travers un phénomène de « mini-négligence » [82, 119]. La détection de cibles simples (une croix ou un point) apparaissant dans l'hémichamp droit ou gauche montre des temps de réaction beaucoup plus longs à gauche qu'à droite chez les dyslexiques [82]. Hari et Renvall concluent également à une mini-négligence gauche sur la base d'épreuves de jugement d'ordre temporel consistant à dire, par exemple, laquelle de deux barres présentées à droite et à gauche du point de fixation est apparue la première [119]. Dans ce type de tâches, les dyslexiques présenteraient une difficulté spécifique pour répondre aux items présentés à droite par rapport à des sujets normo-lecteurs, suggérant une difficulté d'orientation de l'attention vers la gauche. De plus, une fois l'attention engagée sur un processus, les dyslexiques seraient incapables de désengager l'attention vers un autre processus [85]. Le trouble visuo-attentionnel pourrait donc expliquer une part du déficit phonologique dans la dyslexie [86]. Néanmoins, ce trouble pourrait ne se manifester que dans certaines formes de dyslexies de développement. En effet, les études qui ont pris en compte les profils cognitifs des enfants dyslexiques ont conclu à la présence de troubles visuo-attentionnels chez les dyslexiques phonologiques uniquement [85]. D'autres études ont par ailleurs conduit à remettre en question l'idée d'un trouble spécifique à la modalité visuelle en montrant des difficultés similaires de traitement en modalité auditive, voire même tactile, soit vers un trouble amodal de l'attention.

Trouble de l'empan visuo-attentionnel

Selon certains travaux, un trouble de l'empan visuo-attentionnel pour la lecture serait à associer à certains cas de dyslexie [41]. Ce trouble pourrait survenir indépendamment des troubles phonologiques habituellement observés. La notion d'empan visuo-attentionnel renvoie à la quantité d'informations qui peuvent être traitées simultanément au sein d'une séquence d'éléments distincts. Dans le cadre de la lecture, cette notion renvoie au nombre de lettres du mot qui peuvent être identifiées au cours d'une seule fixation [330]. La notion d'empan visuo-attentionnel s'inscrit dans le cadre du modèle connexionniste de lecture multitrace [9, 331].

Trouble de l'empan visuo-attentionnel dans la dyslexie de développement

Dans une étude de cas, Valdois et al. [330] ont décrit pour la première fois une double dissociation troubles phonologiques/troubles de l'empan visuo-attentionnel en contexte dyslexique. Cette étude oppose deux cas : le premier cas présente une dyslexie de surface et n'a pas de trouble phonologique. Il présente des performances altérées dans une tâche de report de lettres. Il présente donc une réduction de l'empan visuo-attentionnel en l'absence de trouble phonologique associé. Le second cas présente le profil inverse, soit une dyslexie phonologique avec un empan visuo-attentionnel préservé. Bosse et al. [41] ont analysé les performances de deux groupes d'enfants dyslexiques, l'un composé de 68 enfants francophones, l'autre de 29 enfants anglophones. Cette étude a permis de montrer qu'une majorité d'enfants présentait un trouble isolé soit de la conscience phonémique, soit de l'empan visuo-attentionnel, dans les deux populations. Cette étude montre par ailleurs

qu'une proportion importante d'enfants présente un trouble isolé de l'empan visuo-attentionnel.

Lien entre empan visuo-attentionnel et lecture

Bosse et al. [41] montrent une forte corrélation entre les performances des enfants dyslexiques lors d'épreuves visuo-attentionnelles et leurs performances aux épreuves de lecture proposées (niveau de lecture ou lecture de mots isolés). En revanche, les performances visuo-attentionnelles et métaphonologiques de ces enfants ne corrèlent pas, une fois pris en compte l'effet de l'âge. Des analyses de régressions multiples ont par ailleurs montré que leurs capacités de traitement visuo-attentionnel étaient prédictives de leur niveau de lecture indépendamment de leurs capacités de traitement phonologique. Ces résultats suggèrent qu'un déficit de l'empan visuo-attentionnel contribue de façon spécifique au faible niveau de lecture des enfants dyslexiques. En effet, d'après les auteurs, l'empan visuo-attentionnel expliquerait respectivement 29,4% et 36,4% de la variance en lecture de mots irréguliers et de pseudo-mots, alors que les capacités phonologiques expliqueraient 7,5% et 20,3% de cette variance. Les compétences visuo-attentionnelles seraient cruciales pour l'établissement de la voie lexicale de lecture et elles participeraient au développement de la procédure analytique. Les auteurs proposent donc que les compétences phonologiques et visuo-attentionnelles seraient nécessaires à la lecture, dans la mesure où leur incapacité constitue des facteurs indépendants sous-jacents aux déficits cognitifs responsables de la dyslexie de développement.

1.3.4 *Troubles de la coordination motrice et de la mémoire procédurale*

En dehors des troubles de la lecture, la présence chez certains enfants dyslexiques de nombreux troubles associés (trouble de l'automatisation des processus et de tonus musculaire, sens de l'équilibre altéré, maladresse générale, traitement rapide des informations, trouble de la coordination des mouvements (apraxie), difficultés dans l'exécution du geste graphique (agraphie), problèmes pour articuler les sons de la langue, etc. . .) associée à l'importance du cervelet dans ces phénomènes ont amené Fawcett et Nicolson à proposer une hypothèse cérébelleuse de la dyslexie. Ne niant pas l'existence de problèmes phonologiques des dyslexiques, ils s'en accommodent en proposant qu'un dysfonctionnement du cervelet en soit la cause. Tirant leur inspiration en partie de la théorie motrice de la perception de la parole [156], ces chercheurs supposent qu'une mauvaise automatisation des gestes articulatoires de la parole, due à un problème cérébelleux, aurait pour conséquence une faiblesse des représentations phonémiques correspondantes [204, 205]. Comme dans le cadre de l'hypothèse phonologique, ces mauvaises représentations constitueraient un handicap majeur pour l'apprentissage de la lecture. Certaines études d'imagerie fonctionnelle sont venues corroborer cette hypothèse en montrant des activations cérébelleuses anormales lors de tâches d'apprentissage de séquences motrices [206]. Toutefois, il faut garder en mémoire que la théorie motrice de la perception de la parole n'établit pas nécessairement un lien entre les fonctions du cervelet et l'élaboration des représentations phonologiques. De plus, différentes études ne sont pas parvenues à reproduire les résultats initiaux de Fawcett et Nicolson qui mettaient en évidence les troubles

cérébelleux. D'autres études montrent bien la présence d'un trouble cérébelleux, mais pas celle d'un lien causal entre ce déficit et les problèmes de lecture d'une part et d'ordre phonologique d'autre part [234].

1.3.5 *L'hypothèse du déficit d'ancrage, vers une unification ?*

En 2007, Merav Ahissar [5] proposa la théorie du déficit de l'ancrage. Elle s'appuie sur une idée de Harris, formulée 60 ans auparavant [121]. Ce dernier constata que les protocoles qui incluaient un son de référence répété lors de comparaisons de deux sons rapportaient de bien meilleures performances des sujets, par rapport à un test sans son de référence. Il attribua ce bénéfice à une sorte d'« ancrage » perceptif, un phénomène analogue à l'oreille absolue, par lequel une référence interne stable est formée graduellement, cet ancrage remplaçant la référence externe. Ainsi, dans les tâches perceptives standards, après de nombreux essais, chaque stimulus peut être évalué par une comparaison avec une référence interne. Ahissar postule que ce phénomène d'ancrage serait déficitaire chez les dyslexiques. Une étude récente [6] montre que, pour une tâche de comparaisons de sons (on présente deux sons successifs aux sujets et ils doivent déterminer lequel est le plus aigu), lorsque les paires de sons sont présentées aléatoirement, sans référence, les performances des dyslexiques sont comparables à celles des enfants contrôles. Dès lors qu'on implémente une référence dans les paires de sons (c'est à dire qu'un même son sera présent dans chacune des paires) alors les performances des sujets contrôles s'améliorent grandement, tandis que celles des enfants dyslexiques restent similaires (voir figure 3). Elle en déduit que la capacité des dyslexiques à « fabriquer » une représentation du son de référence est altérée. De plus elle met en évidence que la performance des dyslexiques, avec le paradigme contenant la référence mais pas avec celui sans référence, était corrélée avec leur score de mémoire phonologique, ce qui semble suggérer que leurs performances avec ces deux types de tâches sont limitées par un goulot d'étranglement commun. Ceci peut en effet expliquer les déficiences de traitement phonologique observées chez la majorité des dyslexiques.

De plus, la théorie de la déficience de l'ancrage peut également expliquer les difficultés des dyslexiques lors des tâches d'identification de sons de Tallal [309]. Sans ce mécanisme d'ancrage, le système perceptif devient beaucoup plus sensible aux bruits externes, comme c'est le cas dans la perception des dyslexiques [122]. Dans son étude, Ahissar [6] testa l'écoute de mots dans du bruit. Les sujets devaient répéter le mot entendu. Au fur et à mesure de l'écoute du stimulus, les sujets contrôles font d'abord quelques erreurs phonologiques puis affinent progressivement leurs réponses jusqu'à répéter le mot juste, alors que les mêmes erreurs phonologiques persistent chez les dyslexiques, avec équiprobabilité des mots répétés. Ces résultats indiquent que, dans la population générale, la perception de la parole, similairement à la perception de sons purs, se focalise rapidement sur les stimuli répétés. Ceci peut expliquer le phénomène bien connu de l'effet cocktail : dans un environnement bruyant, tel que le traditionnel cocktail post oral de thèse, on peut malgré tout soutenir une conversation avec une personne. Ahissar suggère que les dyslexiques ne sont pas capables d'effectuer

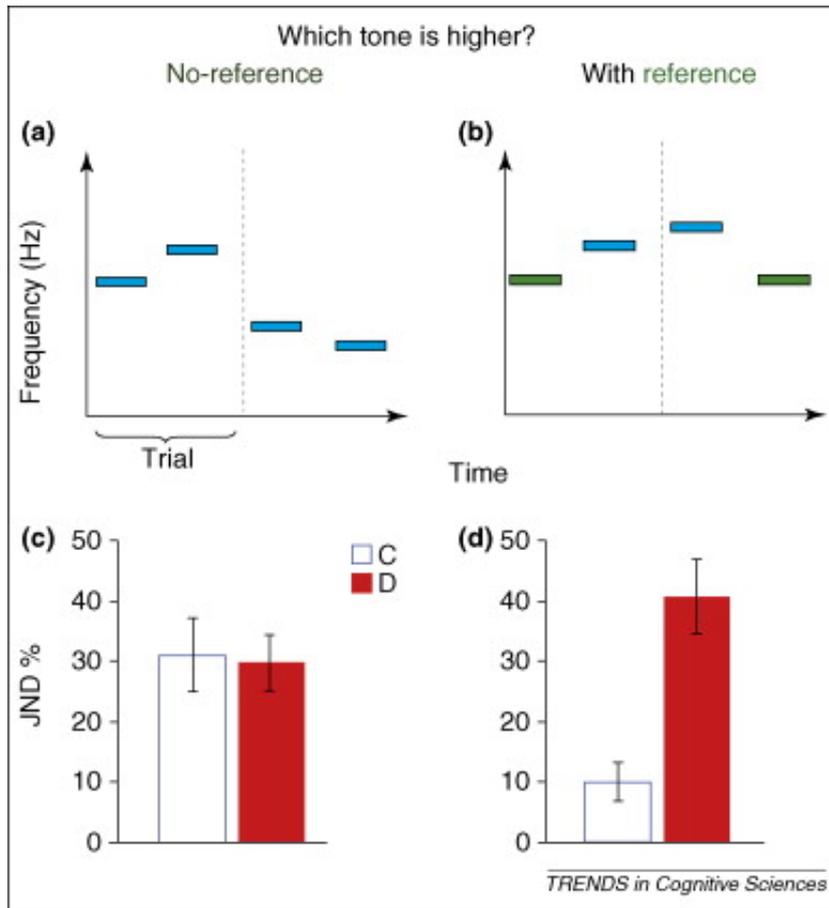


FIG. 3: L'incapacité à ancrer le stimulus de référence (tiré de Ahissar [6]). A gauche, on soumet des paires de sons de fréquences différentes à des sujets contrôles (en blanc) et dyslexiques (en rouge). Leur performance à rapporter le son le plus aigu est équivalente. A droite, chaque paire est composée d'un son aléatoire plus un son référence fixe. On peut voir que la performance des contrôles s'améliore grandement alors que celles des dyslexiques est mauvaise.

cette tâche dans de bonnes conditions, ne pouvant se concentrer sur les paramètres spécifiques (répétitifs) du discours de leur interlocuteur. En effet, une des caractéristiques commune aux dyslexiques est leur sensibilité croissante aux bruits extérieurs [285].

Qu'en est-il du déficit visuel présumé des dyslexiques ? Il semblerait que, comme nous l'avons déjà évoqué, certains dyslexiques souffrent d'un déficit de type magnocellulaire. Cependant les résultats à ce sujet ne sont pas clairs. Dans une étude [20], les auteurs trouvèrent que le type de tâche utilisée lors de l'évaluation était déterminant dans la mise en évidence d'un déficit chez les dyslexiques. Quand on leur demandait de comparer séquentiellement des stimuli (paradigme temporel de choix forcé), les dyslexiques eurent des difficultés à réaliser la tâche, alors qu'aucun déficit ne fut trouvé si les deux stimuli étaient présentés de manière simultanée (paradigme spatial de choix forcé). Des résultats similaires furent trouvés dans une autre étude [21]. Prises ensemble, ces études indiquent qu'en modalité visuelle, à l'instar de l'auditif, les difficultés des dyslexiques sont plutôt « tâche-dépendantes » que

« stimulus-dépendantes » et sont révélées lorsque la mémoire de travail perceptuelle doit être mobilisée. Si aucune étude n'a montré clairement un déficit d'ancrage en modalité visuelle chez les dyslexiques, de récentes recherches suggèrent que les déficits visuels sont aussi liés à une utilisation implicite de la répétition de stimuli. Toutefois, au contraire des résultats en modalité auditive, aucune corrélation n'a été observée entre les déficits visuels et le niveau de lecture. De plus, dans une tâche visuelle pure d'identification de pseudo-lettres encapsulées dans de vraies lettres, les performances des dyslexiques ne diffèrent pas de celles des contrôles [272]. Ainsi, il n'y a aucune évidence que les processus visuels imposent un goulot d'étranglement aux habiletés de décodage des dyslexiques.

En ce qui concerne le déficit attentionnel des dyslexiques (voir section précédente), la théorie du déficit d'ancrage peut être vue comme une hypothèse de déficit attentionnel spécifique. Elle propose en effet que les performances des contrôles avec des cibles répétées deviennent conjointement plus tolérantes au bruit et plus efficaces.

L'hypothèse la plus généralement admise en ce qui concerne la dyslexie est l'hypothèse du déficit phonologique. Cette hypothèse propose, comme nous l'avons déjà vu, que les représentations phonologiques sont altérées, floues ou mal définies. Cependant, il n'existe pas d'examen direct permettant de mesurer la capacité d'un sujet à se fabriquer des représentations phonologiques abstraites, les études se focalisent donc sur la précision du niveau d'entrée de ces représentations, c'est à dire la perception catégorielle de la parole. Cette perception catégorielle se réfère à notre capacité à différencier les sons de la paroles lorsqu'ils appartiennent à des catégories distinctes (par exemple, /ba/ versus /da/). Les résultats des études portant sur ce phénomène ne sont pas concordantes entre elles. Cependant, il existe un consensus quant à la présence de déficits importants chez les dyslexiques en perception catégorielle de sons synthétiques par rapport aux sons de parole naturelle (voir par exemple Godfrey et al. [108]). Les résultats montrés par Godfrey sont en parfaite adéquation avec les prédictions de la théorie du déficit d'ancrage, qui veut que les contrôles et les dyslexiques ne diffèrent que peu au niveau de leur perception catégorielle des sons synthétiques lors des premiers stimuli, et que la différence va évoluer au fur et à mesure des stimuli présentés. Un effet similaire est attendu quand la tâche requiert la catégorisation de stimuli nouveaux, et non-phonologiques, qui peuvent être également sujets à l'ancrage perceptif. De tels résultats on été rapportés [110].

Une étude très récente de Ramus et Szenkovits, spécialement élaborée pour tester les représentations phonologiques chez les dyslexiques en leur faisant passer une large batterie de tâches phonologiques aboutit à la même conclusion [233]. Les auteurs ne trouvèrent aucune indication d'un quelconque déficit des représentations phonologiques. La performance des dyslexiques était seulement altérée lorsque les conditions expérimentales mettaient la mémoire de travail à l'épreuve. Ils proposèrent que le déficit des dyslexiques réside dans l'accès à ces représentations. Tant leurs résultats que leurs interprétations vont dans le sens de la théorie du déficit d'ancrage.

Comme nous venons de le voir, la théorie du déficit d’ancrage semble expliquer la majeure partie des déficits trouvés au sein des différentes théories de la dyslexie. Toutefois, il n’existe aucune preuve d’un impact direct du déficit d’ancrage sur la lecture naturelle. La théorie du déficit d’ancrage propose seulement que des aspects variés de l’amorçage perceptuel, qui sont altérés chez les dyslexiques, ont un impact important sur la facilité à lire. Cependant, des preuves indirectes de ce lien ont été mises en évidence [67].

1.4 UNE ORIGINE BIOLOGIQUE

Depuis les observations faites par Déjerine, à la fin du XIX^{ème} siècle, il a été constaté qu’après lésion cérébrale, un trouble de la lecture pouvait survenir. Il a fallu cependant un siècle, avec les descriptions de quelques cas anatomo-pathologiques par Galaburda dans les années 1980, puis l’avènement de l’imagerie cérébrale, pour que cette origine biologique soit mise en évidence dans la dyslexie de développement. Les travaux décrivant les bases cérébrales de la dyslexie de développement depuis les observations de la structure du cerveau aux études de neuroimagerie fonctionnelle sont exposés ci-dessous.

1.4.1 Évidences anatomiques

Tout d’abord, certaines observations montrent que le cerveau de patients dyslexiques présente des caractéristiques morphologiques différentes par rapport au cerveau de personnes normo-lectrices. Ces observations concernant des aspects macroscopiques visibles « à l’œil nu » (observations faites aujourd’hui grâce à des analyses morphométriques en Imagerie par Résonance Magnétique (IRM)) ou par dissection et observation au microscope.

Au niveau microscopique

Galaburda a recherché les anomalies cérébrales des dyslexiques à travers l’étude de plusieurs cas [96, 97]. Au niveau microscopique, il a pu remarquer de nombreuses ectopies correspondant à des îlots de corps cellulaires dans la couche la plus externe du cortex, surtout dans l’aire périsylvienne de l’hémisphère gauche et notamment dans le planum temporale (région temporale postérieure au gyrus de Heschl). L’hémisphère droit et le reste du cerveau apparaissent normaux. De plus, plusieurs études en imagerie cérébrale fonctionnelle montrent un déficit au niveau de ces mêmes régions [76]. Ces résultats ont été repris par les défenseurs de l’hypothèse phonologique comme une preuve de leur théorie aux vues de l’importance de ces régions dans les processus linguistiques. D’après eux, ces malformations cérébrales à la base des dysfonctionnements cognitifs seraient dues à certains facteurs génétiques [232]. Par exemple, le déficit en perception catégorielle déjà évoqué auparavant [261], dans le cadre de l’hypothèse phonologique, et suivant un déterminisme génétique, pourrait s’expliquer par le fait que les réseaux neuronaux codant la représentation de ces catégories seraient défectueux. Certains travaux montrent qu’un tel modèle est en effet plausible et permettrait d’expliquer à la fois les données comportementales et celles issues de la neuroimagerie [150].

Une ectopie cérébrale est une position anormale de certains neurones, généralement due à une migration incomplète de ces derniers.

*Au niveau macroscopique**Le planum temporale.*

Une étude en IRMf [151] a montré la variabilité fonctionnelle de cette région chez des sujets dyslexiques. Les résultats montrent, à haute fréquence, une asymétrie du planum temporale chez les dyslexiques comparés à des sujets témoins. Ces résultats confortent les résultats trouvés antérieurement et concernant la corrélation entre dyslexie et symétrie du planum temporale. Une hypothèse clé dans l'étude de Larsen et al. concerne l'association entre une symétrie anormale et une déficience spécifique dans le décodage phonologique. Il s'est avéré que tous les sujets dyslexiques avec des déficits phonologiques purs avaient une symétrie anormale du planum temporale. Il est ainsi possible d'établir un substrat neurobiologique spécifique de déficiences dans les stratégies de lecture. En outre, Léonard et al. [154] ont montré que chez les dyslexiques, deux gyri de Heschl apparaissaient dans l'hémisphère gauche, au lieu d'un seul chez les sujets témoins. Ils ont également pu démontrer la présence d'une asymétrie droite, tout comme les auteurs précédents. Ces données ont été confirmées [96] avec une précision : l'asymétrie se retrouvait dans les deux hémisphères. Ils ont également montré des polymicrogyri au niveau postérieur du gyrus de Heschl et du planum temporale gauche.

Le corps calleux.

Plusieurs études ont montré une anomalie au niveau de la taille du corps calleux chez les sujets dyslexiques qui induirait un défaut de communication entre les deux hémisphères. Ceci pourrait expliquer certains troubles mais actuellement les implications de cette anomalie ne sont pas claires. Une autre étude [338] a montré, en IRMf, un corps calleux moins développé chez les sujets dyslexiques par rapport à des sujets témoins. L'étude réalisée sur 22 hommes dyslexiques, a révélé que les dyslexiques ont un corps calleux plus petit, notamment au niveau de la partie médiane postérieure de la région de l'isthme. Cette région contient des fibres nerveuses inter-hémisphériques provenant des aires corticales auditives primaires et secondaires. Cette différence, dans cette région, a été retrouvée chez 78% des sujets testés. En revanche, aucune autre différence n'apparaît dans les autres parties du corps calleux. Ce résultat rejoint donc l'hypothèse d'un déficit au niveau du décodage auditif.

Analyse du volume de substance grise.

Dans une étude publiée très récemment, Pernet et al. ont mis en avant plusieurs différences anatomiques entre dyslexiques et normo-lecteurs [219]. Les différences observées, portent sur des indices de latéralisation ainsi que sur le volume de substance grise. Ces mesures corrôlaient avec les performances phonologiques, de lecture et d'orthographe au niveau de plusieurs régions du cerveau, à savoir le cortex occipito-temporal (bilatéralement), le gyrus temporal supérieur gauche ainsi que sur une partie du cervelet. Les auteurs postulent un dysfonctionnement assez général impliquant un réseau cérébral large qui permettrait d'expliquer la variété des déficits décrits dans la dyslexie de développement.

1.4.2 *Le fonctionnement du cerveau dyslexique*

Les techniques de neuroimagerie fonctionnelle apportent en complément des données comportementales des informations très importantes sur les déficits sous-jacents mais également sur les stratégies compensatoires utilisées pour la lecture. Nous allons donner un aperçu des différentes régions cérébrales reconnues comme présentant un fonctionnement différent dans les dyslexies de développement. A la suite de cela, nous aborderons le déroulement temporel de ces activités à partir des données obtenues avec la méthode des potentiels évoqués.

Les régions cérébrales impliquées

Différentes régions du cerveau semblent présenter une activité particulière chez des sujets dyslexiques par rapport à des normo-lecteurs. Une réduction de l'activation de la partie postérieure du cortex temporal inférieur ainsi que du cortex temporal moyen a été observée dans des tâches de lecture [46, 218], de décision phonologique [248, 270] et de décision sémantique [270]. Les niveaux d'activation de ces régions sont corrélés chez l'enfant avec le niveau de lecture. Dans une tâche de lecture de mots et pseudo-mots réalisée en Magnéto-Encéphalographie (MEG), Salmelin et al. observaient un déficit d'activation de la région temporo-occipitale inférieure gauche 180 ms après présentation de mots, chez les sujets dyslexiques contrairement au groupe contrôle qui présentait une augmentation d'activation [251]. Ce déficit d'activation temporo-occipitale était interprété par les auteurs comme une incapacité à traiter la forme globale des mots à un niveau pré-lexical, ou à extraire l'information phonologique immédiate. Dans une étude qui comparait des dyslexiques adultes de trois langues différentes (français, italien, anglais) à des normo-lecteurs, Paulesu et al. [218] ont montré que quelque soit le degré d'opacité de la langue (dans un étude comparant Anglais, Français, et Italien), les dyslexiques présentaient un déficit d'activation du gyrus fusiforme et de la partie moyenne du gyrus temporal inférieur dans l'hémisphère gauche. Dans les tâches de rimes et de mémorisation (impliquant la conscience et la mémoire à court terme phonologique), l'activité cérébrale des participants dyslexiques est restreinte à l'aire de Broca pour la tâche de rimes, et au cortex pariétal inférieur pour la tâche de mémorisation. En outre, dans les deux cas, les dyslexiques n'activent pas, en comparaison aux sujets normo-lecteurs, la région du cortex située entre ces deux zones, c'est à dire le cortex insulaire [217]. Les auteurs interprétèrent alors la dyslexie comme une déconnexion entre les régions antérieures et postérieures des aires du langage. Cette hypothèse de déconnexion fut confirmée par une étude de Horwitz [130] montrant un déficit, chez les dyslexiques, de co-activation de certaines aires, le gyrus angulaire entre autres. Une réduction de l'activation du gyrus angulaire a également été décrite, pendant des tâches de décision sémantique [265, 270] et de jugement de rimes portant sur des lettres [318]. L'activation de cette aire est, de même, corrélée avec le niveau de lecture chez l'enfant [249]. De plus, le gyrus supra-marginal gauche [74, 75, 216] semble avoir un fonctionnement déficitaire chez les dyslexiques.

La modulation de l'activité au niveau du cortex frontal inférieur gauche est différente en fonction des tâches utilisées dans les études. En effet, une augmentation de son activité est observée chez des adultes

dyslexiques dans des tâches de lecture explicite mais pas dans des tâches de détection de lettres par exemple où la lecture est implicite [46, 268]. L'activité de cette région est positivement corrélée au niveau de lecture. Dans leur étude en MEG, Salmelin et al. [251] observaient, outre l'hypoactivation de la région temporo-occipitale inférieure gauche, une hyperactivation de l'aire frontale inférieure gauche 400 ms après l'onset, chez les sujets dyslexiques. Dans une tâche de perception de sons de parole chez des dyslexiques, un réseau impliquant le cortex frontal inférieur et le gyrus supramarginal est activé avec une augmentation de l'activité dans l'aire de Broca [247]. Ces résultats pourraient mettre en évidence un réseau compensatoire au niveau du cortex frontal inférieur quand l'activité du gyrus temporo-occipital ou le gyrus supramarginal est déficitaire, avec une mobilisation plus importante des ressources phonologiques chez ces sujets. En appui à cette hypothèse, cette même région était hyperactivée dans un cas de dyslexie de surface [225]; or on sait d'un point de vue comportemental que ces patients se reposent principalement sur la voie sublexicale de lecture et mobilisent leurs connaissances phonologiques pour parvenir à lire correctement. En revanche, Démonet et al. [76] précisent que certaines études reportent une activité moins importante de cette région chez des participants dyslexiques. L'activation de la région homologue dans l'hémisphère droit serait le témoin d'une stratégie compensatoire délétère. Shaywitz et al. [270] montrent une activité du cortex frontal inférieur droit plus élevée dans une tâche de décision phonologique chez des sujets dyslexiques non compensés. Cette région n'étant pas active chez les mêmes sujets en lecture à haute voix, les auteurs interprètent ces activations particulières comme étant associées à la mémoire de travail et à la charge de travail impliquée par la recherche en mémoire. Par ailleurs, Shaywitz et al. [265], dans une étude en IRMf réalisée chez l'enfant, montrent qu'avec l'âge, l'activité des deux régions frontales inférieures bilatérales augmente particulièrement chez les participants présentant un retard de lecture.

Plus récemment étudié en imagerie fonctionnelle, le cervelet semble présenter également une activité caractéristique dans une population dyslexique par rapport à des témoins sans déficit de lecture. Une étude faite en Tomographie par Emission de Positons (TEP) chez l'adulte [136] avait montré que chez des sujets adultes, le cervelet était impliqué dans la réalisation de mouvements automatiques ainsi que dans l'apprentissage de nouveaux mouvements. Cette étude, répliquée avec des adultes dyslexiques a montré une activation moindre du cervelet dans les deux tâches (mémorisation, et apprentissage). En fait, 80% des dyslexiques présenteraient des signes cliniques de troubles cérébelleux [207]. Une activité moindre dans le cervelet droit dans la dyslexie a également été relevée dans un protocole d'apprentissage moteur en TEP [206], mais aussi en réponse à des changements acoustiques rapides en IRMf [317]. Zeffiro et Eden [351] proposent que le trouble cérébelleux ne serait pas spécifique mais résulterait indirectement d'un trouble cortical, effet lié aux connexions étroites entre cortex et cervelet. Enfin, Shaywitz & Shaywitz proposent aujourd'hui que la « signature » de la dyslexie soit une désorganisation de deux systèmes cérébraux de l'hémisphère gauche postérieur — l'un pariéto-temporal et l'autre occipito-temporal — couplée à un engagement compensatoire du gyrus frontal inférieur et de la région occipito-temporale postérieure droite [269].

Le bref aperçu que nous venons de présenter sur les régions cérébrales impliquées dans la dyslexie montre toute la complexité du processus de langage, ainsi que la multiplicité des régions cérébrales pouvant jouer un rôle dans la dyslexie. On peut encore citer des anomalies trouvées dans le gyrus précentral [228], le gyrus frontal supérieur [10], le gyrus frontal moyen [25, 39, 62, 91, 226, 275], le gyrus postcentral [200, 305], le lobe pariétal [93, 273, 291], le pôle temporal [178], le gyrus temporal moyen [39, 226, 273], et le gyrus temporal inférieur [25, 62, 227, 74]. Enfin, des anomalies de la substance blanche ont également été décrites [16, 128]

Connectivité cérébrale dans la dyslexie

Nous venons de faire un bilan des zones cérébrales pouvant être atteintes dans la dyslexie. Bien sûr, le cerveau ne saurait être réduit à un assemblage d'aires chacune traitant des informations bien précises. Ces zones communiquent entre elles et ces voies de communication peuvent également être altérées chez les sujets dyslexiques.

La connectivité fonctionnelle est une technique non-invasive et puissante utilisée pour étudier la distribution des réseaux neuronaux chez les sujets normaux et ceux souffrant de troubles cliniques. La première étude de connectivité concernant la dyslexie fut réalisée par Horwitz et collaborateurs [130] grâce à la technique de TEP afin d'étudier le gyrus angulaire et ses connexions dans des processus phonologiques. Ils trouvèrent un défaut de cohérence entre des mesures effectuées dans le gyrus angulaire et les régions pariéto-temporales, suggérant une disconnection fonctionnelle entre les régions cérébrales impliquées dans le processus d'analyse phonologique à un stade initial de décodage.

Lorsque cette méthode est utilisée en IRMf, les régions cérébrales fonctionnellement connectées peuvent être caractérisées par des fluctuations basse-fréquence dans le signal Blood Oxygen Level Dependant (BOLD) quand le sujet effectue une tâche continue [118, 174]. La réponse BOLD d'une tâche continue mène à des changements cohérents de signal dans des régions anatomiquement disjointes mais fonctionnellement connectées. Dans la première étude de connectivité fonctionnelle en IRMf, Pugh et collaborateurs [227] montrèrent des disconnections fonctionnelles entre le gyrus angulaire et les régions pariétales de l'hémisphère gauche spécifiques des processus phonologiques. Dans une autre étude en IRMf, Shaywitz [270] compara les connexions fonctionnelles associées à la région occipito-temporale gauche chez des adultes normo-lecteurs et des adultes dyslexiques. Une connectivité fut trouvée entre la région occipito-temporale et le gyrus frontal inférieur gauche chez les normo-lecteurs dans une tâche de lecture de mots. Les dyslexiques, par contraste, eurent des connexions fonctionnelles entre la région occipito-temporale gauche et les gyri frontal moyen et frontal inférieur droit.

Les études de connectivité dite effective supposent des influences unidirectionnelles en IRMf. Utilisant cette approche, Bitan et collaborateurs [31] trouvèrent une connectivité fonctionnelle commune et unique dans l'hémisphère gauche pour une tâche de jugement de rimes et une tâche de dénomination de lettres. La connectivité commune fut trouvée dans le gyrus frontal inférieur et le gyrus fusiforme. La connectivité unique pour le jugement de rime fut trouvée dans le cortex temporal latéral et

pour l'autre tâche, dans le sulcus intra-pariétal. Ils suggérèrent que le gyrus frontal inférieur joue un rôle de médiateur tâche-dépendant en connectivité. Cette idée est consistante avec d'autres résultats montrant que le gyrus frontal inférieur servirait de centre exécutif des réseaux neuronaux dans les processus de langage [242].

Des anomalies dans les fibres de matière blanche pourraient interférer dans les processus neuronaux, ce qui affecterait indirectement la synchronisation du signal BOLD. Des corrélations temporelles spécifiques de basse fréquence entre les régions cérébrales impliquées dans les processus phonologiques pourraient refléter ces dissociations entre régions cérébrales et ainsi montrer des différences de connections dans les deux populations. Stanberry et collaborateurs [291] reportèrent des différences de connectivité chez des adultes avec ou sans dyslexie durant une tâche métaphonologique. Ils montrèrent que 3 réseaux fonctionnels, définis sur les bases de déficit structurels établis chez les dyslexiques [78] et incluant des régions associées à des processus phonologiques et orthographiques, étant significativement différents en terme d'expansion spatiale, chez les dyslexiques par rapport aux normo-lecteurs : gyrus frontal inférieur gauche, gyrus frontal inférieur droit et cervelet bilatéral.

Marqueurs électrophysiologiques des troubles dyslexiques

Il est connu que les enfants présentant une dyslexie de développement voire même à risque pour la dyslexie (présence de personnes dyslexiques dans la famille proche) peuvent montrer des particularités de l'activité corticale par rapport à des enfants sans déficit. Pour des raisons « pratiques » (voir annexe B), la méthode des potentiels évoqués est une technique qui permet, plus facilement que les techniques d'imagerie fonctionnelle, d'évaluer les troubles chez l'enfant. Nous allons passer en revue les différences observées chez des participants dyslexiques sur les principales composantes impliquées dans le traitement du langage écrit mais aussi phonologique.

Traitement visuel primaire.

Nous avons vu précédemment que l'analyse des traits visuels d'une séquence de lettres ou de tout autre symbole induit une activité dans le cortex extra-strié 100 ms après présentation du stimulus. Cette phase de traitement semble ne pas être déficitaire chez les sujets dyslexiques [124, 313, 252].

Traitement pré-lexical.

La première phase d'activation spécifique au traitement des lettres, reflétée par une activité occipito-temporale 150 à 200 ms après présentation du stimulus, diffère significativement entre les sujets dyslexiques et témoins dans de nombreuses études (onde N₁₀₀ ou M₁₀₀ retardée et réduite en amplitude chez les sujets dyslexiques) [124, 252, 251, 313]. L'augmentation de l'amplitude de cette onde pendant l'apprentissage de la lecture semble d'ailleurs être caractéristique de la qualité de l'apprentissage. Dans une étude longitudinale, Maurer et al. ont étudié un groupe d'enfants avant et après apprentissage de la lecture (première année) [184]. Ils ont montré que l'amplitude de la N₁ (150 à 270 ms) lors

de la présentation de mots versus séquences de lettres augmentait avec l'apprentissage et son maximum se situait au niveau occipito-temporal. En outre, les auteurs observent que cette augmentation est moindre chez les enfants présentant des difficultés de lecture à l'issue de la première année d'enseignement.

Traitement lexicaux.

Stelmack et al. [300] ont observé une composante P200 (traitement précoce des mots) plus ample chez les dyslexiques par rapport aux témoins, dans une tâche de lecture silencieuse. Taylor & Keenan [316] ont montré quant à eux que des sujets dyslexiques présentent un allongement des latences de N2 dans une tâche de décision lexicale, confirmant les observations précédentes de Ciesielski [56]. Chez ces patients, les ondes caractéristiques des traitements de lettres ou de mots sont moins amples et retardées par rapport aux sujets normo-lecteurs [124, 252, 251].

Traitements attentionnels.

Duncan et al. ont observé des anomalies de la P300 chez des adultes ayant souffert de dyslexie, mais uniquement chez ceux ayant souffert aussi de troubles attentionnels (syndrome d'hyperactivité ou Attention-Deficit Hyperactivity Disorder (ADHD)) [73]. Ainsi, puisque des déficits attentionnels sont fréquemment observés chez les dyslexiques, il est difficile de prédire si les anomalies de P300 sont liées à la dyslexie en tant que telle, ou aux troubles attentionnels associés [315].

Traitement sémantique.

Stelmack et Miles [299] ont observé une N400 réduite chez les sujets dyslexiques, interprétant cette observation comme un déficit de mémoire sémantique à long terme. À l'inverse, Robichon et al. [244] ont observé une N400 plus ample chez des adultes dyslexiques. Ainsi, deux hypothèses sont valables au vu de ces résultats : l'intégration sémantique pourrait être déficiente ou plus coûteuse chez les dyslexiques par rapport aux normo-lecteurs, ou bien les dyslexiques pourraient utiliser, quand ils lisent, des stratégies sémantiques différentes de celles des normo-lecteurs.

Traitement phonologique de bas niveau.

En ce qui concerne l'intégration phonologique, certains travaux parmi les plus importants sur les corrélats électrophysiologiques de la dyslexie ont utilisé la réponse évoquée auditive spécifique qu'est la MMN. Différentes équipes ont montré l'existence de déficits auditifs chez certains enfants ayant des difficultés d'apprentissage de la lecture [142] (voir pour une revue [147, 155, 210]). Les enfants ayant des difficultés de lecture réalisent moins bien les tâches de discrimination de parole que les enfants normo-lecteurs, ce déficit étant corrélé avec une diminution de la MMN. Ces résultats suggèrent que les enfants dyslexiques souffriraient de déficits des voies auditives, en amont de la perception consciente (la MMN étant corrélée au traitement auditif de bas niveau),

mais uniquement pour le traitement du langage [256].

Traitement phonologique de haut niveau.

En ce qui concerne, la reconnaissance de mots et de pseudo-mots, Espy et al. [81] ont montré dans une étude longitudinale chez des apprentis que l'onde N1 est associée au décodage phonologique, en perception de pseudo-mots. Cette N1 serait plus négative chez les enfants présentant un retard de lecture. Dans une étude d'amorçage phonologique, les enfants dyslexiques présentaient une déviance dans les composantes N1 et N2 (associées respectivement à l'encodage de pseudo-mots et des mots), alors que le tracé était normal pour la N400, mettant en évidence un déficit pré-lexical et non sémantique [38]. En catégorisation phonologique versus sémantique, les performances et corrélats neurophysiologiques entre bons et mauvais lecteurs, diffèrent uniquement pour le traitement phonologique avec une négativité plus importante à 480 ms pour les dyslexiques [171, 172]. Dans des tâches de jugement de rimes une composante tardive (qui intervient autour de 450 ms) [58, 57, 112] serait déviante dans la dyslexie, en présentation visuelle de mots, [3] ou des lettres [173] ou en présentation auditive [187].

1.5 PROGRAMMES D'INTERVENTION DANS LES DYSLEXIES DE DÉVELOPPEMENT

Les programmes d'entraînement pour les enfants atteints de dyslexie développementale ont commencé à être développés il y a de cela quelques années et ont évolué de concert avec les résultats de la recherche concernant la nature sous-jacente des déficits impliqués. L'étude des troubles observés dans les dyslexies de développement (tant sur la lecture que sur les facultés associées) a donné lieu à un certain nombre de recherches testant l'efficacité de ces programmes d'intervention. Nous allons à présent examiner la question des stratégies utilisées pour améliorer les capacités de lecture d'enfants dyslexiques. Nous nous attarderons plus particulièrement sur les études portant chez l'enfant déjà diagnostiqué (pour l'évaluation d'actions précoces, voir par exemple : Blachman [32], Bowyer-Crane et al. [42], J.K. Torgesen et al. [325], F. R. Vellutino et al. [337]). Les études que nous allons présenter sont mises en place tantôt en milieu scolaire avec le soutien d'éducateurs, tantôt à domicile avec l'aide des parents. A la suite de cela, nous décrirons quelques travaux réalisés en neuroimagerie.

1.5.1 Études comportementales

De nombreux types de programmes sont décrits dans la littérature. Certains d'entre eux sont basés directement sur des activités de lecture. Mais le plus souvent, ce sont les compétences sous-jacentes à la lecture (telles que la conscience phonologique ou encore l'attention visuelle) qui sont la cible de ces recherches. Je vais donc décrire ci-après quelques études qui visent, à travers l'amélioration du niveau de lecture des participants, à corroborer les hypothèses sur les troubles explicatifs de la dyslexie de développement.

Entraînement des capacités phonologiques et de lecture en milieu scolaire

La prépondérance de l'hypothèse phonologique sur la scène des explications plausibles a entraîné la réalisation d'un grand nombre d'études de rééducation des enfants dyslexiques. Ce phénomène est renforcé par le fait que de nombreuses études sont menées dans le but d'optimiser les méthodes d'apprentissage de la lecture chez les normo-lecteurs.

Torgesen et al. décrivent une étude comparative de deux modes d'intervention phonologique en milieu scolaire de langue anglaise [324]. L'étude porte sur une population de 60 enfants présentant une dyslexie sévère entre huit et dix ans et qui bénéficiaient déjà d'un enseignement spécifique de la lecture. L'entraînement se déroulait comme ceci : pendant huit semaines, 67.5 heures d'enseignement individuel étaient dispensées à raison de deux fois 50 minutes par jour, cinq jours par semaine. Puis, après cette période, une session quotidienne de 50 minutes était donnée pendant encore huit semaines. Cette phase avait pour but d'aider les enfants à appliquer leurs nouvelles compétences dans les tâches de lecture. L'étude a comparé l'effet de deux méthodes : une version dérivée du Lindamood Phoneme Sequencing Program for Reading, Spelling, and Speech (LIPS) et le programme Embedded Phonics (EP). Les deux impliquaient un enseignement permettant de développer les capacités de décodage phonologique, la stimulation de la conscience phonologique et la construction d'un lexique visuel pour les mots de haute fréquence. La méthode LIPS cherchait en outre à développer une bonne conscience phonologique en associant systématiquement à un phonème, le nom du geste articulatoire qui y est associé (eg., les phonèmes /p/ et /b/ sont nommés "lip poppers"). Dans la méthode EP, l'enseignement explicite sur les phonèmes était moindre qu'avec la méthode précédente. Cette méthode fait plus appel à la lecture de textes. Les résultats obtenus montrent que les performances augmentent nettement après l'entraînement dans de nombreuses tâches (lecture, décodage phonologique...). Pour le décodage phonologique, c'est la méthode LIPS qui semble être la plus efficace (la méthode EP montrant aussi de bons résultats). Pour la lecture de texte, la méthode EP se rapproche de LIPS. Enfin, les résultats sont sensiblement identiques pour la compréhension. Ces résultats perdurent globalement dans le temps. En plus de mettre en évidence qu'un entraînement basé sur l'apprentissage explicite de sons de la langue montre au moins d'aussi bons résultats qu'un entraînement basé sur la lecture, Torgesen, souligne l'intérêt d'un entraînement intensif et approprié pour des enfants présentant des troubles sévères en lecture [324].

D'autre part, Lovett et al. [169] ont comparé deux types de programmes d'intervention, le premier était basé sur la reconnaissance des mots et les capacités de décodage (DS), le deuxième utilisait la langue orale et écrite (OWLS). Les deux programmes ont permis d'améliorer la lecture mais le programme DS a été plus bénéfique que le programme OWLS, soulignant un bon transfert des compétences phonologiques vers le niveau de lecture. L'étude de O'Saughnessy et Swanson va également dans ce sens [212]. Les auteurs ont en effet comparé l'évolution des performances d'enfants entre 8 et 10 ans avec un déficit en lecture aux quels l'on proposait un programme de 6 semaines, basé soit sur la conscience phonologique, soit sur le repérage d'analogies entre mots soit sur les mathématiques (groupe contrôle). Les deux groupes travaillant sur le langage ont vu leurs performances progresser dans des tâches en rap-

port avec leur entraînement respectif, en lecture, et ces progrès ont été transférés à d'autres tâches (compréhension, production écrite). Dans cette étude, les enfants qui avaient le meilleur niveau d'identification de mots au départ sont ceux qui ont fait le plus de progrès. En revanche, l'effet inverse a également été observé [349] avec d'autant plus de chances d'améliorer son niveau de lecture que celui-ci était déficitaire au départ. D'autres programmes qui ciblent les mêmes compétences que celles décrites dans Torgesen [324] à savoir, phonologie, compréhension, fluence, pourraient en outre être la clé du succès chez des enfants/adolescents dyslexiques dits résistants [166, 167, 170, 348]. En effet, les résultats contrastés obtenus à la suite de certains programmes d'intervention sur la lecture et les compétences associées pourraient par ailleurs s'expliquer par la présence dans les groupes entraînés d'enfants avec des difficultés persistantes [7, 168, 169].

Effets d'un entraînement audiovisuel dans différents contextes à différents niveaux scolaires

Ecalle & Magnan [77, 176, 177] ont évalué les effets d'un entraînement audiovisuel (basé sur la correspondance entre sons/syllabes entendues et leur version écrite). Cet entraînement informatisé administré en classe, ou dans la famille de l'enfant utilise un logiciel « Play-On » [64] de discrimination auditive et visuelle de paires minimales comme « ba » et « pa » [177]. Il dure 10 heures réparties sur 5 semaines, deux fois 15 minutes par jour, 4 jours par semaine. Son évaluation a été réalisée d'abord chez 14 enfants dyslexiques qui ont été randomisés en 2 groupes : un groupe entraîné les 5 premières semaines et l'autre non entraîné, puis les groupes ont été permutés afin que chacun bénéficie de l'entraînement. Le travail montre un effet clair de l'entraînement. Cette étude a été répliquée dans deux nouveaux groupes de 7 enfants dyslexiques en école spécialisée dans laquelle les enfants bénéficiaient d'une prise en charge orthophonique en plus de l'entraînement informatisé [176]. Les améliorations observées restent du même ordre, à ceci près que les enfants s'améliorent également dans la période sans entraînement, du fait certainement de la rééducation orthophonique. Il semble que dans cette étude les bénéfices de la rééducation orthophonique et de l'entraînement informatisé aient été additifs. Enfin, les mêmes auteurs ont effectué une étude complémentaire comparant deux nouveaux groupes d'enfants dyslexiques, l'un suivant toujours le même entraînement informatisé à l'école, au rythme de 30 minutes par jour, 4 jours par semaine pendant 5 semaines, l'autre suivant le même entraînement à la maison, les enfants travaillant à leur propre rythme, pendant la même durée [176]. Les résultats donnent un avantage au groupe entraîné à la maison. Ceci pourrait être du au fait que le groupe entraîné à la maison a bénéficié d'un entraînement plus intensif que celui entraîné à l'école (spontanément ou sous le contrôle des parents). Ce résultat suggère à la fois qu'une plus grande intensité des entraînements pourrait être encore plus profitable à l'enfant. Dans une dernière étude [77] utilisant le même logiciel, les auteurs ont comparé l'évolution de deux groupes d'enfants dyslexiques en collèges spécialisés. L'un d'eux suivait l'entraînement de discrimination phonologique décrit ci-dessus, l'autre suivait un autre type d'exercice proposé dans le logiciel « Play-On » de lecture de courtes histoires avec présentation mot à mot des éléments de chaque phrase. Les performances en lecture du premier groupe se

sont améliorées significativement plus que celles du second pour des tâches de lecture de mots réguliers, irréguliers et de pseudo-mots.

Entraînement de la perception auditive

L'hypothèse d'un problème de traitement des informations rapides, avancée par Tallal [307], a vite donné naissance à la commercialisation d'un programme de rééducation appelé FastForward (FFW). Ce programme est composé d'exercices que l'enfant réalise sur un ordinateur. Le programme inclut un algorithme qui prolonge artificiellement les sons phonémiques et amplifie certaines parties de ces sons. Les sons utilisés peuvent ou non appartenir à la langue. Au fur et à mesure que l'enfant progresse les modifications apportées aux stimuli sonores diminuent. Chaque exercice est fait à raison de 20 minutes par jour. Au bout de 30 jours les enfants ont généralement terminé le programme : ils peuvent effectuer au moins 5 des exercices avec des sons modifiés. Globalement, les résultats obtenus avec un entraînement sur le traitement rapide des informations montrent parfois un gain réel dans toutes les composantes du langage, parfois uniquement sur la conscience phonologique, et parfois aucun gain n'est observé. Dans de nombreuses études, les gains furent réels mais équivalents à ceux obtenus sans modification de la parole [223]. Plusieurs études ont été menées sur ce programme. Deux études pilotes ont été réalisées par les créateurs du programme et ont décrit que les performances des enfants ont été améliorées, notamment sur les tâches de perception catégorielle [312]. Toutefois, d'autres études pilotes menées par des équipes indépendantes ont eu du mal à répliquer ces résultats et concluent que le lien entre l'utilisation de FFW et une amélioration systématique des performances linguistique n'est pas démontré [162, 105].

Une importante étude de terrain a aussi été réalisée sur 500 enfants [312] mais, de par sa méthodologie (absence de randomisation et de groupe contrôle, population mal définie), cette étude apporte peu de soutien à la valeur thérapeutique du programme FFW. Comme le signale Ramus [230], la méthode est très chère et son utilisation chez environ 20000 enfants aux États-Unis et au Canada n'a fait l'objet d'aucune publication convaincante concernant son efficacité. De plus, Démonet et al. [76] rappellent que ces enfants présentaient des troubles du langage oral tant sur le versant de la production que sur le versant perceptif en plus des troubles du traitement temporel. Une étude plus récente [194] utilise le même jeu chez des enfants de 8 à 10 ans sans problème de lecture. Par rapport à un groupe contrôle (qui ne bénéficie d'aucun entraînement de ce type), les enfants testés voient leurs performances augmenter significativement plus sur une tâche de jugement de rimes et d'acronymes auditifs (contrepèteries) mais les progrès ne sont relativement pas plus importants en lecture de mots ou pseudo-mots. D'autres entraînements se focalisant sur le traitement temporel auditif n'ont pas mis en évidence de généralisation des effets à la lecture [4, 302].

De plus, la connaissance théorique incomplète concernant les déficits rend difficile la prédiction d'un possible transfert de cette rééducation à une autre langue que l'anglais, langue utilisée dans la plupart des études. L'anglais est en effet une langue dont l'écrit est parmi les plus difficiles à acquérir pour les enfants dyslexiques, alors que le Français, l'Espagnol et l'Italien engendrent moins de difficultés (voir la revue de Ziegler et al. [352]). Il est donc possible qu'un programme créé en Anglais puisse aider des enfants, alors qu'un programme similaire en

français n'aurait que des effets limités. L'efficacité d'un entraînement phonologique axé sur le traitement rapide de la parole en Français a été évalué par Habib et al. [116]. Les auteurs ont étudié l'efficacité d'un entraînement intensif grâce à certains exercices dérivés de ceux proposés par Merzenich et al. [190] et par Tallal et al. [311]. Les stimuli auditifs furent ralentis artificiellement avec amplification de brèves portions instables du signal sonore. Dans une étude, les auteurs ont comparé deux groupes de dyslexiques âgés de 10 à 12 ans : un fût entraîné avec la version du langage modifié et l'autre avec les mêmes exercices mais sans modification sonore (placebo). Les résultats montrèrent que les enfants entraînés avec la modification de la parole s'améliorèrent de manière significativement supérieure sur les tâches de conscience phonologique que les enfants ayant bénéficié du placebo. Toutefois, les deux groupes s'améliorèrent de manière équivalente sur les tâches de langage oral et sur les tâches de lecture. Certains chercheurs font cependant remarquer que ces résultats pourraient en partie être expliqués par un changement de la façon dont les ressources attentionnelles sont utilisées et qu'une étude similaire avec un groupe contrôle suivant une thérapie attentionnelle pourrait tester cette hypothèse [120].

Entraînements de la perception visuelle

La première méthode de rééducation présentée ici s'inscrit dans le cadre de la théorie magnocellulaire de la dyslexie. Elle est illustrée par une étude de thérapie sur, au moins, 147 enfants dyslexiques. Stein et collaborateurs ont essayé de traiter les problèmes de vergence et de fixation binoculaire chez ces enfants et ont montré à quel point une amélioration pouvait se généraliser à la sphère cognitive et à la lecture. Deux groupes furent constitués. Les enfants du groupe contrôle devaient porter des lunettes teintées pour toute activité de lecture et d'écriture. Les enfants du second groupe devaient porter des lunettes équivalentes mais avec une occlusion de l'oeil gauche, ce qui était censé améliorer le contrôle oculomoteur. Au bout de 9 mois de traitement, les enfants avec une occlusion mono-oculaire avaient des performances de lecture améliorées par rapport au groupe contrôle [298]. Toutefois, il est difficile de conclure quant à l'importance de l'amélioration de la fixation binoculaire dans le changement de la capacité à lire. En effet :

- la mesure de la fixation binoculaire dans cette étude ne semble pas idéale, le test de fixation binoculaire étant peu reproductible, ces résultats ont été vivement critiqués [76].
- l'amélioration de la fixation n'était pas durable dans le temps pour tous les enfants.
- les enfants dont la capacité de lecture progressait, n'amélioraient pas tous leur fixation, ce qui semble incohérent avec l'hypothèse qu'une mauvaise fixation binoculaire soit la cause d'une incapacité à apprendre à lire [87].

Le succès de certains programmes d'intervention visuelle va dans le sens de l'hypothèse d'un trouble de l'attention visuelle [51, 84, 82, 83, 276, 331]. Ces programmes manipulaient le format de présentation de mots sur un ordinateur, tant au niveau du lieu d'apparition que de la durée ou de la possibilité de prédire l'apparition du mot (« Visual Hemisphere-Specific Stimulation ») [85, 165, 164]. Ces études ont eu pour résultat une amélioration attendue de l'attention visuo-spatiale. Le niveau de lecture était également amélioré de façon plus importante

après l'entraînement spécifique par rapport à un entraînement linguistique [85]. Il en est de même pour la mémoire verbale et la conscience phonologique [165].

Les rééducations motrices

Au moins deux méthodes peuvent rentrer dans le cadre de l'hypothèse cérébelleuse. Reynolds et al.[238] ont ainsi suivi 35 enfants pendant 6 mois alors qu'une partie d'entre eux effectuait de façon quotidienne tout un programme d'exercices qui incorporent des éléments de thérapie visuo-motrice et vestibulaire. On y trouve notamment des exercices de double tâche, d'étirement et de coordination.

Cette étude a montré chez les enfants rééduqués une amélioration supérieure des performances aux quatre tests du Dyslexia screening test. Il est toutefois difficile de conclure car, comme le notent les auteurs, aucun exercice n'était effectué par le groupe contrôle pendant les 6 mois. Il est donc impossible de savoir dans quelle mesure les effets observés ne sont pas simplement dus à un effet placebo ou Hawthorne⁶ [238].

Une autre étude plus rigoureuse a été réalisée par Mc Philipps et al. [188]. Cette étude était focalisée sur le fait que certains dyslexiques souffrent d'une persistance de certains réflexes primitifs présents à la naissance mais qui disparaissent normalement avec l'âge. Trois groupes de 20 enfants furent suivis pendant un an. Le premier groupe disposait d'un ensemble de mouvements à réaliser à raison de 10 minutes par jour. Ces mouvements étaient censés corriger la présence des réflexes primitifs. Le second groupe devait effectuer des mouvements placebo avec la même fréquence que le groupe précédent. Enfin, un dernier groupe servait de contrôle et n'effectuait aucun mouvement. Cette étude a montré, entre autres, un effet du traitement sur l'amélioration des performances aux tests de la Neale Analysis et de la Weschler Objective Reading Dimension. Bien que ces résultats soient encourageants, il est difficile de savoir dans quelle mesure ils sont généralisables à l'ensemble de la population vu que seuls des enfants ayant des réflexes primitifs persistants ont été inclus [188]. McPhilipps, dans une étude plus récente [189] repris le même principe que l'étude précédente mais cette fois avec des enfants « tout-venant » de 3^{ème} à 5^{ème} année d'écoles primaires irlandaise. Il obtint ainsi un échantillon de 739 enfants âgés de 7 à 9 ans. Ses résultats suggèrent que la persistance du réflexe tonique du coup ou Asymmetrical Tonic Neck Reflex (ATNR) —réflexe néonatal disparaissant normalement environ 6 mois après la naissance— est un bon prédicteur de perturbations de la lecture et de l'épellation et est un relativement bon prédicteur de la lecture de non-mots. McPhilipps suggère toutefois que la persistance des réflexes foetaux n'est pas la cause directe des problèmes de lecture ; il existe en effet des enfants avec un haut niveau de persistance de ce type de réflexe et qui sont cependant de très bon lecteurs. La persistance de ces réflexes peut néanmoins être vue comme un facteur de risque précoce pour l'enfant, dont les effets sont dépendants de l'interaction entre facteurs cognitifs, environnementaux et biologiques.

6 On appelle effet Hawthorne l'explication de résultats, positifs ou négatifs, qui ne sont pas dus aux facteurs expérimentaux, mais à l'effet psychologique d'avoir conscience d'être le groupe étudié dans une recherche. Cet effet fut montré à la suite d'une étude de Snow, chargé en 1925, de mesurer les effets d'un meilleur éclairage sur le rendement des ouvriers de la Western Electric Company de Chicago.

J'évoquerai également ici le rééducation de type posturale dite « Méthode de Lisbonne ». Cette méthode jouit d'une popularité croissante en grande partie due à la grande publicité faite autour dans la majeure partie des différents types de média grand public. L'efficacité de cette méthode posturale ne repose, à ce jour, sur aucun fondement scientifique. Une seule étude dirigée par Fabian Robichon a essayé de l'évaluer. Les résultats ont montré un très faible intérêt de cette méthode pour les troubles de la lecture, de l'orthographe et de la phonologie. Il a même été constaté une aggravation des troubles chez certains enfants. Les résultats de cette étude ont été présentés lors de la XII^{ème} journée de l'Association de Posturologie Internationale (API), tenue à Paris les 27 et 28 janvier 2006.

Nous n'irons pas plus en avant dans ces techniques alternatives pour lesquelles les présumés effets observés en lecture sont difficiles à relier à la technique utilisée en elle-même. Il convient de signaler que lorsque l'on utilise, pour améliorer le niveau de lecture d'un enfant, un programme qui n'intègre absolument pas de stratégie reliée directement à la lecture (comme dans les études ci-dessus, qui utilisent tantôt des exercices physiques [238] ou même des compléments alimentaires [243]), les résultats observés sont toujours à relativiser en fonction de la méthodologie adoptée. Bishop, dans une excellente communication [26], offre un ensemble d'éléments à prendre en compte pour une approche critique de l'étude des ces programmes d'intervention comme par exemple, la validité scientifique de l'hypothèse sur laquelle repose l'étude; le rapport coût/bénéfice (en cause notamment dans le cas de FFW [190]); la présence et validité d'un groupe contrôle, etc. (voir également Alexander & Slinger-Constant [7] pour une revue).

Dans l'ensemble, les travaux qui montrent les résultats les plus consistants sur l'amélioration (immédiatement après entraînement et à plus long terme) du niveau de lecture sont ceux qui incluent une part phonologique et un traitement visuo-verbal (voir les revues proposées par Alexander & Slinger-Constant [7, 15, 170, 271, 324, 322]). De la synthèse de l'ensemble de ces travaux, Shaywitz et al. [271] rapportent que la mise en place systématique, intensive et ciblée d'un programme d'intervention permettrait, même chez les enfants présentant les déficits les plus sévères, d'améliorer le niveau de lecture, tant pour la fluence que pour la compréhension et ce avec des méthodes basées sur différents types de compétences.

1.5.2 *Les apports de l'imagerie fonctionnelle à l'évaluation des thérapies*

La montée en puissance des techniques d'imagerie fonctionnelle est porteuse de beaucoup d'espoir pour ceux qui voudraient essayer de tirer au clair les différentes questions qui hantent le champ de recherche de la dyslexie. En allant du problème de la définition et de l'existence putative de plusieurs sous-types, en passant par la controverse faisant rage autour de ce/ces troubles, jusqu'à la rééducation, aucun de ces domaines n'est vierge de la trace laissée par la TEP, l'IRMf, la MEG et l'Electro-Encéphalographie (EEG).

Même si quelques anecdotes existent en imagerie (voir notamment l'étude de cas de Duffy & MacAnulty [70]), il aura fallu attendre les 10 dernières années pour voir apparaître quelques études formalisées.

Les débuts, une observation du changement métabolique

La première a été réalisée par Richards et al. [239] en imagerie par spectroscopie de résonance magnétique. Cette technique bien qu'ayant une résolution spatiale plus faible que l'IRMf permet de mesurer directement les variations du métabolisme cérébral. Quinze garçons (8 dyslexiques et 7 contrôles) ont passé deux séances d'imagerie à un an d'intervalle, où ils devaient effectuer des tâches de décision lexicale et de jugement de rime. Pendant cette année les enfants dyslexiques avaient suivi une thérapie en petit groupe à raison de 15 séances de 2 heures sur 3 semaines. Les rééducations étaient principalement orientées vers l'aspect phonologique et morphologique de la langue. Des séances de suivi étaient aussi organisées pendant les mois suivants.

D'un point de vue neuropsychologique, 8 mois après le début du traitement 75% des enfants dyslexiques avaient des performances normales sur des tâches de conscience phonologique et le groupe montrait aussi des améliorations des aptitudes phonologiques de mémoire et de décodage. Dans le même espace de temps, d'un point de vue métabolique, ces mêmes enfants montraient une normalisation de leur taux de lactate dans le quadrant antérieur gauche du cerveau pendant la réalisation de la tâche de rimes. Toutefois, ces mêmes enfants montraient une augmentation de leur taux de lactate pendant la tâche de décision lexicale et ce, dans la même région du cerveau.

Les auteurs en concluent que l'entraînement phonologique faciliterait le traitement phonologique et l'activité cérébrale nécessaire à sa réalisation dans le quadrant antérieur gauche du cerveau. Ils émettent cependant l'hypothèse qu'il pourrait y avoir un « trade-off » et que cette amélioration du traitement phonologique pourrait se faire aux dépens de celui de l'accès au sens [239].

Modifications électrophysiologiques

Kujala et al. [149] ont suivi 48 enfants dyslexiques âgés de 7 ans alors que la moitié d'entre eux participait à une rééducation. Deux fois 10 minutes par semaine pendant 7 semaines, ces enfants jouaient à des jeux vidéos impliquant la comparaison de séquences de stimuli audio-visuels abstraits. Un sous échantillon de 22 enfants eut en plus des séances d'EEG pour l'enregistrement de leur MMN.

Les enfants rééduqués présentaient une amélioration en vitesse et en exactitude de leur lecture de mots courts. Il a aussi été mis en évidence que la rééducation entraînait une augmentation de l'amplitude de la Mismatch Negativity et que cette amélioration était corrélée à celle observée en lecture. Ces résultats semblent montrer qu'il est possible d'améliorer les performances de lecture avec une rééducation basée sur des stimuli de nature non linguistique. De plus, de par la nature pré-attentive de la MMN, ces résultats semblent aller dans le sens de la présence chez les dyslexiques d'un déficit de traitement de bas niveau. Une autre étude permet d'exclure le rôle du tronc cérébral.

Ainsi Hayes et al. [123] ont suivi un groupe de 32 enfants dont 17 avaient une rééducation de 8 semaines grâce au programme Earobics™ à raison d'une quarantaine de séance d'une heure. Ce programme inclut plusieurs exercices travaillant entre autre la conscience phonologique et utilise des stimuli dont les transitions rapides ont été ralenties.

D'un point de vue comportemental, il fut trouvé que les enfants entraînés voyaient une amélioration de leur score de traitement auditif

Une analyse plus précise de la MMN sera faite dans la partie 3

de la batterie Woodcock-Johnson-Revised. En parallèle, ces mêmes enfants avaient des EEG montrant des réponses corticales plus matures (moins ample et de latence plus courte) à l'écoute passive d'un /ga/ et moins sensibles à la présence d'un stimulus déviant lors de l'écoute passive d'un /da/. En revanche, les réponses anormales issues du tronc cérébral restèrent inchangés. Ainsi les phénomènes de plasticité cérébrale semblent plus présents au niveau cortical, ce qui est confirmé par d'autres études [123]. Santos, et al. [254] ont testé chez 10 enfants dyslexiques et 10 enfants normo-lecteurs l'effet d'un entraînement phonologique et audiovisuel [64, 114, 116] sur la perception d'incongruités sémantiques en modalité auditive. Avant entraînement, la P300 (entre 200-700 ms) n'était modulée par le niveau d'incongruité que chez les normo-lecteurs seulement. Après entraînement, les participants dyslexiques présentaient le même patron d'activité que les normo-lecteurs. Cette étude montre une meilleure intégration sémantique de l'information auditive, en plus de l'effet bénéfique de l'entraînement sur les performances comportementales (en lecture, métaphonologie et écriture). Dans une autre étude portant sur des enfants normo-lecteurs, la même équipe reporte les effets d'un entraînement musical [195]. Par rapport à des enfants bénéficiant d'un entraînement à la peinture, les participants du groupe expérimental ont montré une amélioration des capacités de lecture associée à la modulation électrophysiologique de la perception d'incongruités mélodiques et sémantiques suggérant que la perception de la parole peut également être améliorée par un entraînement musical. Au-delà des effets immédiats d'un entraînement, certaines données de neuroimagerie obtenues en pré/post intervention tentent d'apporter quelques éléments de réponse concernant la plasticité cérébrale à plus long terme et par conséquent, les réseaux mis en jeu pour la compensation.

La MEG fut également utilisée afin d'étudier les changements électrophysiologiques liés à une rééducation. Par exemple, Simos et al. [274] ont observé chez un groupe de 8 enfants dyslexiques en rééducation, le changement des réponses cérébrales en MEG à une tâche de jugement de rimes de pseudo-mots. Ces enfants avaient le choix entre 2 programmes de rééducation : Phono-Graphix et Lindamood Phonemic Sequencing, tous les deux principalement axés sur l'apprentissage de la conscience phonologique. L'étude incluait également un groupe contrôle de 8 enfants normolecteurs. Après 8 semaines de thérapie à raison de 1-2 heures par jour, les capacités de décodage phonologique des enfants rééduqués furent normalisées. Le principal changement observé au niveau neuro-fonctionnel fut la prépondérance du signal en région pariétal gauche, chez tous les enfants alors qu'avant rééducation on observait une activation de la région homologue dans l'hémisphère droit. Ce changement était d'ailleurs corrélé positivement avec l'amélioration des performances pendant l'imagerie des enfants rééduqués. Toutefois, l'observation du nombre de sources dans cette région en fonction du temps montrait que, bien que d'amplitude comparable chez les normolecteurs et chez les enfants rééduqués, la latence du pic principal était plus longue chez ces derniers.

Les auteurs concluent que l'entraînement suivi par ces enfants a permis de déclencher la mise en route d'un réseau neural périsylvien gauche qui était auparavant inactif chez eux [274].

Études en Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle

L'IRMf a aussi été utilisée dans le cadre de la rééducation de la dyslexie. Avec 10 enfants dyslexiques et 11 enfants normolecteurs, Aylward et al. [10] ont étudié l'effet d'une rééducation de 14 séances de 2 heures incluant entre autres l'enseignement de la conscience phonologique et du principe alphabétique. Le signal IRM fut enregistré pendant que l'enfant réalisait une tâche d'appariement graphème-phonème et une tâche de morphologie (e.g « dire si le second mot dérive du premier : CORN/CORNER versus BUILD/BUILDER »).

Ces chercheurs observèrent un effet bénéfique de la rééducation sur les performances des enfants traités, en conscience phonologique et en morphologie. De plus, après la remédiation, l'activité de certaines régions pendant la tâche de morphologie était redevenue comparable (e.g la région pariétale supérieure gauche) ou proche (e.g les gyri frontaux moyens et inférieurs gauches) à celles des normolecteurs : l'activité du gyrus fusiforme droit et de la région pariétale supérieure apparaissant également normalisée pendant la tâche de morphologie.

Les chercheurs en conclurent que le traitement de la dyslexie mobilise des circuits neuronaux qui sont impliqués dans la lecture chez les normolecteurs [10].

Cette conclusion est en partie étayée par les résultats de l'équipe de Temple et al. [319]. Les patterns d'activation en IRMf d'un groupe d'enfants normolecteurs lors d'une tâche de jugement de rime, mesurés à deux reprises, furent comparés à ceux d'un groupe d'enfant dyslexiques, avant et après rééducation à l'aide du programme FFW. Les enfants furent rééduqués pendant 100 min, 5 jours par semaine pendant environ un mois. Les enfants ayant bénéficié du programme de remédiation montrèrent une amélioration en lecture de mots et de pseudo-mots et en compréhension. Les résultats d'imagerie montrèrent principalement une augmentation de l'activité des régions temporo-pariétales gauche et du gyrus frontal inférieur. Une corrélation fut d'ailleurs trouvée entre l'amélioration des résultats sur une épreuve de langage oral et l'augmentation d'activité dans cette région d'intérêt (ou Region Of Interest (ROI)) temporo-pariétale gauche. En revanche, certaines régions de l'hémisphère droit (une majeure partie du cortex frontal et une partie du gyrus temporal moyen) apparurent aussi activées. Ici aussi, une corrélation a été trouvée entre les progrès réalisés en traitement phonologique et les changements d'activité d'une ROI située au niveau du cortex frontal inférieur droit [319].

Les auteurs concluent que FFW permettrait d'une part la normalisation de l'activité des réseaux neuronaux sous-tendant la conscience phonologique. D'autre part, il permettrait aux enfants d'utiliser des réseaux de compensation, notamment dans l'hémisphère droit, mais pourrait aussi les aider sur le plan attentionnel, comme en témoigne l'augmentation de l'activité cingulaire après rééducation.

Des résultats quelques peu similaires ont été trouvés dans une étude plus récente, réalisée par Shaywitz et al. [266]. Ces chercheurs ont testé les effets d'un enseignement intensif (50 minutes par jour pendant 8 mois) du principe alphabétique à 37 enfants dyslexiques. Cette étude incluait aussi 2 groupes contrôles : le premier groupe comportait 12 enfants dyslexiques suivant une thérapie contrôle et le second était constitué de 28 enfants normolecteurs ne suivant aucune thérapie. A deux reprises ces enfants passèrent une IRMf où ils devaient effectuer une tâche d'identification de lettres.

Les enfants rééduqués améliorèrent leur fluence de lecture jusqu'au niveau des enfants normolecteurs. De plus les patterns d'activation post-intervention de ces deux groupes étaient similaires à l'exception d'une hypoactivation au niveau du noyau caudé droit des enfants rééduqués. En revanche les enfants ayant suivi la thérapie contrôle présentaient toujours une hypoactivation des gyri frontal inférieur et temporal moyen gauches. Toutefois, après un IRMf de suivi chez les enfants rééduqués, on pouvait observer un maintien de l'activité des gyri frontaux inférieurs de façon bilatérale, du sillon temporal supérieur gauche et de la région occipito-temporale gauche, tandis que l'activité du noyau caudé droit et du gyrus temporal supérieur droit diminuait. Ces résultats montreraient que :

- les enfants dyslexiques utiliseraient un réseau neuronal de compensation dans l'hémisphère droit
- tout en remplaçant le réseau de compensation par un autre, similaire à celui des normolecteurs tant au niveau antérieur pour le traitement phonologique, qu'au niveau postérieur pour la reconnaissance automatique des formes [266].

Les précédentes études se focalisent surtout sur la visualisation en IRMf des aires cérébrales impliquées avec les capacités phonologiques des sujets. N. Gaab, E. Temple et P. Tallal réalisèrent en 2006 la première vraie étude de validation de la théorie du déficit temporel auditif [94]. Vingt-deux enfants dyslexiques et 23 enfants contrôles furent examinés dans cette étude. Les sujets eurent une séance d'IRMf avant et après rééducation, cette dernière étant basée sur une version de FFW sans aucun stimuli de type orthographique. Pendant les scans en IRMf, les sujets étaient soumis à des stimuli non linguistiques avec une structure spectro-temporale équivalents à des syllabes consonne-voyelle-consonne. Les stimuli pouvaient soit avoir une transition rapide ou lente, et également un pitch rapide ou lent (soit 4 types de stimuli au total). Les sujets devaient presser un bouton lorsqu'ils croyaient entendre un stimulus au pitch rapide. La rééducation était relativement intense, avec 5 sessions de 20 minutes par jour, 5 jours par semaine pendant un total de 8 semaines. Tous les sujets dyslexiques améliorèrent de manière significative leur performance à plusieurs tâches comportementales testant les capacités métaphonologiques. Concernant l'imagerie cérébrale, les auteurs trouvèrent notamment une région dans le cortex préfrontal gauche (Brodmann Area (BA) 10) présente chez les enfants contrôles mais pas chez les enfants dyslexiques avant rééducation. On voit apparaître une activité significative dans cette région après rééducation chez ces mêmes enfants dyslexiques. Les auteurs suggèrent que cette région joue un rôle prépondérant dans le traitement rapide des informations auditives et le séquençage temporel, tant pour les sons du langage que pour les autres sons comme semblent le suggérer d'autres études [34, 100, 137]. Ils ajoutent également que les dyslexiques avant rééducation montrent un nombre très faible d'activation cérébrale par rapport aux contrôles, comme si leur réseau neuronal était « fonctionnellement sourd » à la différence entre transition rapide et lente. La rééducation de type FFW semble améliorer les activités dans ce réseau. Les auteurs notent toutefois qu'il n'est pas possible de déterminer si la rééducation à améliorer principalement les capacités de traitement auditif, ce qui aurait une influence sur le langage et/ou sur les capacités d'alphabetisation, ou si cette rééducation améliorerait un panel plus large de capacités cognitives et motivationnelles.

Richards et Berninger réalisèrent la première étude sur l'effet d'une rééducation sur la connectivité cérébrale chez des enfants dyslexiques comparativement à des enfants normo-lecteurs. Ils montrèrent une normalisation des connectivités provenant du gyrus frontal inférieur gauche chez les enfants dyslexiques, qui tendaient à ressembler à celles des normo-lecteurs après une rééducation de type phonologique [241].

Pour compléter cette revue de la littérature, nous voudrions brièvement mettre en opposition les résultats décrits ici, avec ceux d'une étude similaire réalisée avec des adultes.

Eden et al. [79] ont comparé à 8 semaines d'intervalles les résultats de 10 dyslexiques, avec ceux de 9 autres ayant été rééduqués avec le programme Lindamood (3 heures par jour). Les seconds avaient amélioré leur performances sur des tests impliquant la conscience phonologique. Cette amélioration s'était aussi en partie généralisée à l'exactitude de la lecture du paragraphe. Au niveau neuro-fonctionnel les activations lors d'une tâche de suppression phonémique furent également affectées. Le traitement s'avéra modifier l'activité des régions pariétales gauches, du gyrus fusiforme gauche, mais aussi du gyrus temporal supérieur, du gyrus angulaire, du cortex pariétal supérieur et du cortex frontal inférieur dans l'hémisphère droit. Ainsi, il semblerait que, même si les jeunes dyslexiques peuvent normaliser leur profil d'activation, cela soit impossible pour des dyslexiques d'un âge plus avancé. En effet ceux-ci même après rééducation, n'ont pas montré les activations observées chez des normolecteurs lors de cette tâche. Les auteurs ne tirent pas de conclusion définitive sur ce dernier point mais émettent l'hypothèse qu'un phénomène de « délatéralisation » pourrait être à l'oeuvre [79].

Après cette revue de la littérature concernant l'apport de l'imagerie aux techniques de rééducations, que peut-t-on en conclure ? Tout d'abord, il semble y avoir un consensus sur le fait que des enfants dyslexiques soumis à des rééducations vont connaître des modifications d'activation cérébrale, soit de « compensation », soit une « amélioration » des réseaux neuronaux de lecture existants. Ceci reste cependant assez vague, et on peut s'apercevoir qu'il n'existe pas vraiment de consensus quant à l'effet précis des rééducations, sur le plan des activations cérébrales mais aussi sur le plan comportemental. En effet, des rééducations ne contenant aucun stimuli de langage semblent avoir quand même un effet bénéfique chez les enfants dyslexiques sur le plan cérébral et comportemental.

Nous allons maintenant aborder le travail expérimental que nous avons réalisé au sein des deux unités de recherche Inserm (U825) et CNRS (UMR8158). Nous commencerons par l'étude comparant des rééducations du point de vue des performances et des activations cérébrales obtenues en *fMRI* réalisée au sein du Laboratoire de psychologie et développement de Paris V. Cette étude a été menée dans le cadre d'un PHRC national dirigé par le Service de Pédiatrie neurologique de l'Hôpital Rober Debré (Prof Ph. Evrard).

Nous continuerons ensuite avec l'étude en *EEG* sur le déficit auditif pré-attentif chez le dyslexique. Cette dernière étude fait partie d'un projet européen nommé *Neurodys* ayant pour but d'étudier les problèmes d'apprentissage chez l'enfant, sur le plan comportemental, sur le plan de l'imagerie cérébrale, ainsi que sur le plan génétique. L'étude à laquelle j'ai participé au sein de ce projet est le fruit de la collaboration

de 4 laboratoires européens : l'INSERM U825 de Toulouse, le « Center of Excellence in Learning and Motivation Research, Department of Psychology » de Jyvaskyla (Finlande), le « Department of Child and Adolescent Psychiatry, Psychosomatics and Psychotherapy » de Munich (Allemagne) , ainsi que le « Department of Psychophysiology, Research Group of Developmental Psychophysiology » de Budapest (Hongrie). Pour chacune de ces deux études , nous commencerons par exposer la problématique, puis nous aborderons la méthode utilisée afin de répondre à ces problématiques. Enfin après avoir décrit les résultats, nous discuterons des implications et des perspectives.

Deuxième partie

ETUDE 1 : COMPARAISON DE
RÉÉDUCTIONS CHEZ L'ENFANT ATTEINT
DE DYSLEXIE DÉVELOPPEMENTALE :
ÉTUDE COMPORTEMENTALE ET EN
IMAGERIE PAR RÉSONANCE MAGNÉTIQUE
FONCTIONNELLE.

La recherche rapportée dans ce chapitre a été initiée dans le cadre d'une demande du ministère de la santé faite au Professeur Philippe Evrard (Directeur du Service de Neuropédiatrie de l'Hôpital Robert Debré à Paris), à S. de Schonen (CNRS) et Marie-Thérèse LeNormand (INSERM).

2.1 INTRODUCTION

Nous l'avons vu dans la première partie, malgré la multiplicité des études réalisées depuis des décennies, la recherche sur la nature de la dyslexie n'a pas encore révélé les mécanismes précis des déficits de l'apprentissage de la lecture. Par ailleurs, pour des raisons évidentes, les programmes de rééducation de la dyslexie développementale se sont multipliés. Il est certes plus intéressant et raisonnable pour un chercheur de poursuivre des études sur la nature de la dyslexie pour ultérieurement développer sur la base des connaissances acquises des programmes de rééducation justifiés. Néanmoins, à côté de la collection de pratiques rééducatives enseignées classiquement dans les écoles d'orthophonistes et qui sont, le plus souvent, mises à jour au fur et à mesure des découvertes, il existe d'autres programmes de rééducations en vogue, considérés comme bénéfiques par les parents et les enseignants du 1er cycle. Or certains de ces programmes sont remboursés par la sécurité sociale sans que l'efficacité de ces pratiques soient évaluées. C'est dans ce contexte que le Ministère de la Santé a requis l'évaluation d'un programme de rééducation, appelé Sémiphonie (*Sem*), utilisé dans les pays francophones et qui est considéré par les parents et par les enseignants comme une méthode efficace.

Il a été décidé, pour ce faire, de comparer la *Sem* à deux autres rééducations :

- Une version francisée de *FFW*, appelée Entraînement par parole modifiée (*Mod*) (voir chapitre précédent, 1.5.1. « Entraînement de la perception auditive »)
- La rééducation la plus utilisée en France, que nous appellerons Entraînement Standard (*Stand*). Cette rééducation est celle communément pratiquée par les orthophonistes sur des enfants atteints de dyslexie développementale.

Dans la mesure où les méthodes *Sem* et *Mod* s'adressent avant tout à la dyslexie phonologique et que la méthode *Stand* s'adapte aux déficits présentés par les enfants rééduqués (donc aux déficits phonologiques chez les enfants présentant une dyslexie du type phonologique), cette étude a recruté des enfants dyslexiques avec un déficit phonologique avéré (Voir chapitre sur la méthode).

Afin d'effectuer cette comparaison entre méthodes, il fût décidé d'étudier ces enfants tant sur le plan comportemental (Au moyen d'une batterie de tests appelée batterie BELEC) que sur le plan de l'imagerie cérébrale (Grâce à la technique de l'*IRMf*). Pour chaque rééducation, on dispose donc de ses effets comportementaux sur les performances de lecture, de perception et de conscience phonologiques d'une part et

d'autre part de ses effets sur les activations cérébrales mises en jeu lors de tâches de lecture ou de perception.

2.2 CONTEXTE THÉORIQUE COMPORTEMENTAL

Comme on a pu le voir d'après la première partie de cette thèse, il existe un accord général sur le fait que la majorité (mais pas tous) des enfants atteints de dyslexie développementale souffrent d'un déficit au niveau des processus phonologiques, ce qui se traduit par des performances médiocres en conscience phonologique, en décodage phonologique, en lecture rapide, et en mémoire verbale à court terme [235]. Si l'on considère que l'apprentissage de la lecture dépend de la perception segmentaire de ses unités orales (phonèmes, rimes, attaque¹) ainsi que de leur forme écrite (graphèmes), un déficit phonologique est supposé être l'un des facteurs à l'origine des difficultés à lire. Le débat, nous l'avons vu, reste toutefois entier quant à savoir si ce déficit phonologique est issu d'un déficit sensoriel de plus bas niveau [27, 43, 261, 262]. Des études récentes montrent que des déficits visuo-spatiaux multisensoriels sont corrélés avec des mécanismes sublexicaux qui sont essentiels dans l'apprentissage de la lecture [86]. Cependant, il reste beaucoup de doutes quant au caractère premier du déficit attentionnel, il se pourrait effectivement qu'il ne soit que la conséquence d'un déficit perceptuel [183].

Les programmes de rééducation les plus évalués ces 20 dernières années ont été ceux impliquant un entraînement dans la perception de la parole et la phonologie, et plus spécifiquement, ceux qui se focalisent sur les processus impliqués dans la perception auditive des phénomènes rapides de la parole (comme FFW, déjà cité dans le chapitre 1. Pour une revue voir Pokorni, Worthington & Jamison [223]; Habib, Ray, Daffaure, Camps, Espesser, Jolt-Pottuz & Demonet [116]; Temple, Deutsch, Poldrack, Miller, Tallal, Merzenich, & Gabrielli [319]). Les résultats de cet entraînement sur les processus temporels rapides (plus précisément, la transition entre formants et la période de silence dans les sons de parole, l'information essentielle de ces transitions ne durant que quelques millisecondes) montrent parfois un gain clair dans plusieurs aspects du langage, parfois seulement un gain en conscience phonologique et parfois aucun gain. Dans beaucoup d'études, les gains furent réels mais équivalents à ceux obtenus avec une méthode de rééducation sans rapport avec l'entraînement sur transition rapides [223].

Tant qu'aucune théorie vraiment fiable du déficit primaire de la dyslexie phonologique n'est disponible, il n'est pas raisonnable de penser qu'un programme de rééducation efficace dans une langue donnée le soit également dans une autre langue. La plupart des évaluations ont été faites en Anglais. Or l'apprentissage de la lecture en anglais est bien plus difficile qu'en français, en italien ou en espagnol [352].

¹ Il existe en effet des données selon lesquelles les enfants divisent les syllabes en deux parties. Tout d'abord ce que nous avons appelé l'attaque, qui correspond à la première consonne ou au premier groupe consonantique, puis le reste de la syllabe [141].

2.2.1 *But de l'étude*

Dans cette étude, nous nous demandons si les rééducations *Sem* et *Mod* sont plus efficaces que la rééducation *Stand*, pratiquée communément par les orthophonistes en France. Si la méthode *Sem* ou *Mod* est efficace, il sera alors nécessaire de la développer rapidement. Si elles sont d'efficacité égale, les familles disposeront alors de l'avantage d'avoir plusieurs choix à leur disposition. Si enfin elles se révèlent être moins efficaces que la rééducation *Stand*, elles devront être réexaminées, voire abandonnées.

Le but principal de cette étude est de comparer l'efficacité des trois programmes de rééducation sus-nommés, mais pas d'évaluer si un programme de rééducation, quel qu'il soit, est plus efficace que pas d'entraînement du tout. En effet l'efficacité de la méthode *Stand* est considérée comme médiocre mais réelle au moins en ce sens qu'elle procure un soutien à l'enfant, lui permet d'identifier et de prendre conscience de la spécificité de ses difficultés. Cette méthode est par conséquent la mieux placée pour servir de condition contrôle.

Le deuxième objectif de l'étude est d'examiner l'effet des trois rééducations au niveau de l'activité cérébrale et voir si ces modifications peuvent être corrélées avec les différences de performances observées.

2.2.2 *Rééducation par parole modifiée*

L'entraînement phonologique à l'aide de la parole ralentie ou *Mod* a été évaluée en Français par Habib et al. [116]. Ils étudièrent l'efficacité d'un entraînement intensif d'enfants Français atteints de dyslexie développementale à l'aide d'exercices adaptés de Merzenich et al. [190], et de Tallal et al. [311]. Les résultats montrèrent que les enfants dyslexiques entraînés avec la parole modifiée s'améliorèrent de manière significativement plus importante que les enfants entraînés sans parole modifiée. Toutefois, les deux groupes s'améliorèrent de manière égale sur les tâches de langage oral et de lecture.

Reprenant la même méthode et les mêmes stimuli, une autre étude commencée après notre étude ne trouva aucune différence entre entraînement avec parole modifiée et sans parole modifiée (Billard, Demonet & Sprenger-Charolles, communication personnelle). Magnan et collaborateurs [177] entraînèrent des enfants Français atteints de dyslexie développementale sur des stimuli de paroles avec voix ou sans. Les enfants devaient décider à quel mot écrit correspondait le stimuli. Comparés à un groupe harmonisé d'enfants non-entraînés, le groupe entraîné montra une amélioration dans la reconnaissance des mots écrits. Il est dès lors possible d'en conclure qu'un entraînement par parole modifiée, même s'il n'apparaît pas comme étant plus efficace qu'un autre type de rééducation, est pourtant plus efficace que pas de rééducation du tout.

2.2.3 *La sémiophonie*

Le programme de rééducation *Sem* est censé entraîner les enfants à être attentifs aux signaux de l'enveloppe sonore de basse fréquence temporelle (principalement le rythme syllabique). Le signal continu

reproduisant l'enveloppe sonore du langage est un bruit blanc² modulé, de sorte que, à l'instar de la rééducation *Mod*, aucun aspect sémantique du langage n'a été utilisé au sein de cette rééducation. Donc, au contraire de la rééducation *Mod*, les enfants sont entraînés avec des modulations de bruits blancs à la place de sons de parole. L'extraction de l'enveloppe à partir de la parole et sa transposition dans une bande de fréquence haute est réalisées par un logiciel qui transforme et retransmet le produit de transformation « on line » au fur et à mesure de l'enregistrement de la parole. Ceci permet de faire entendre l'enveloppe de paroles pré-enregistrées aussi bien que de faire entendre l'enveloppe en même temps que les paroles dont elles est extraite.

Une intuition plutôt que des bases théoriques, ont été à l'origine de ce programme [19]. L'auteur pensait intuitivement que le trouble dyslexique pouvait provenir d'une mauvaise intégration des premières caractéristiques de la parole traitées par le nourrisson et que ces premières caractéristiques étaient essentiellement celles de l'enveloppe. Des données concernant le développement de la sensibilité à l'enveloppe sonore et aux rythmes caractéristiques de la parole dans diverses langues, ainsi que leur possible implication dans un déficit du langage sont apparues dans la littérature plus récente.

Le discours continu montre des fluctuations temporelles proéminentes au niveau de l'enveloppe sonore, qui sont en fait des modulations basse-fréquence. Ces modulations d'amplitude se situent entre 2 Hz et 20 Hz, avec un maximum à 3-4 Hz [132]. Dans toutes les bandes d'octave, les modulations de fréquence les plus proéminentes se situent à 3-4 Hz. Le rythme est une propriété des modulations de faible amplitude de l'onde sonore correspondant grossièrement aux modulations d'amplitude des syllabes. Premièrement, les données chez les bébés âgés de moins d'un an suggèrent que ceux-ci sont sensibles aux aspects du rythme du discours qui sont spécifiques à leur environnement sonore. Les bébés segmentent leur environnement sonore de langage conformément à un biais iambique dans la langue Française, une langue syllabique [202], ou avec un biais trochaïque en Anglais, une langue accentuée [139]. Deuxièmement, une étude a montré que les performances en segmentation des bébés sont un relativement bon prédicteur des performances en langage à l'âge de 4 à 6 ans [203]. Troisièmement, des études ont montré que les modulations basse-fréquence sont nécessaires pour une bonne reconnaissance de la parole aussi bien dans le bruit que sans bruit. Les études psychophysiques effectuées sur des personnes sans aucun problème auditif ont montré que les modulations d'amplitude de fréquence se situant entre 4 Hz et 16 Hz sont cruciales pour l'intelligibilité du discours. Des dégradations potentielles au sein de cette bande de fréquence causées par du bruit, de la réverbération ou une manipulation informatique réduisent l'intelligibilité [131, 68, 69, 263, 332, 282]. De plus, des études réalisées tant avec des sujets sans problème auditif [263], qu'avec des sujets souffrant de déficit sensori-neural auditif [327] et des implantés cochléaires [127, 92] ont démontré que la parole est intelligible (c'est à dire avec le minimum d'informations spectrales) que si ces modulations d'amplitude de basse fréquence sont préservées.

En accord avec ces études, les données neuropsychologiques ont montré qu'une perte de sensibilité dans ces modulations d'amplitude de basse

² Bruit dont la densité spectrale de puissance est constante quelle que soit sa fréquence. Le son produit lors de l'effet de « neige » sur un téléviseur non réglé est un bon exemple de bruit blanc.

fréquence est associée avec des troubles du langage et de la parole [163, 245, 350].

Beaucoup de tâches « lentes » comme par exemple la détection de modulation d'amplitude à 4 Hz semblent être relativement difficiles pour des enfants souffrant de trouble développemental du langage. Des études ont en effet montré la difficulté d'enfants dyslexiques à réaliser des tâches de détection de modulation d'amplitude pour des fréquences allant de 2 Hz à 10 Hz, c'est à dire une bande de fréquence correspondant à celle des syllabes en langage oral [110, 245, 198]. Toutefois, une étude [350] n'a trouvé aucun déficit à 2 Hz mais un déficit à 20 Hz chez des adultes dyslexiques. Goswami et al. [110] proposèrent que les enfants dyslexiques ont en fait un déficit dans la le traitement du temps de montée de l'enveloppe d'amplitude de la syllabe. Ils testèrent cette hypothèse dans une situation de détection de ce temps de montée avec des enfants anglais avec ou sans dyslexie. Ils trouvèrent une différence de performance significative entre les deux groupes. Muneaux et collaborateurs [198] confirmèrent ce déficit chez des enfants dyslexiques français.

Ces résultats montrent que les enfants souffrant de dyslexie semblent avoir un déficit au niveau du traitement de l'enveloppe rythmique en langage oral, et ce, bien que leurs langues maternelles aient des différences dans leur caractéristiques rythmiques les unes par rapport aux autres.

L'idée essentielle dans la rééducation *Sem* est de donner l'opportunité aux enfants d'être mis en présence de stimuli sonores constitués exclusivement de modulation d'amplitude de l'enveloppe sonore rythmique du langage oral, transposées dans les variations d'un bruit blanc de haute fréquence (Voir détails plus loin).

Une évaluation de cette rééducation en Anglais [161] a malheureusement été réalisée avec une méthodologie sommaire. Les auteurs montrèrent que, comparés à un groupe d'enfants contrôles dyslexiques ne recevant aucune aide ou une aide très pauvre, une majorité d'enfants rééduqués s'améliorèrent en lecture, en épellation et en test de compréhension. Une évaluation en Français [191] compara un groupe d'enfants dyslexiques âgés de 7 à 14 ans entraînés à l'aide de la *Sem* à un groupe d'enfants entraînés avec le programme *Stand* tel qu'il était en 1993 (c'est à dire avec très peu d'entraînement phonologique). Les deux groupes montrèrent un niveau similaire d'amélioration dans le nombre de réponses correctes pour la mémoire immédiate (syllabes, nombres), en conscience phonologique, en dénomination, en tâches de compréhension, ainsi qu'en lecture. Depuis, des changement techniques ont été apportés à la transformation de l'enveloppe sonore de la parole dans un bruit blanc modulé de telle sorte que la transformation est faite « on line » et est parfaitement fiable. La rééducation *Stand* a également été profondément modifiée, en intégrant de très nombreux exercices permettant un entraînement plus spécifiques aux capacités phonologiques.

Au sein du présent projet de recherche, la spécificité centrale de la rééducation *Sem* (c'est à dire focaliser l'attention sur un certaine nombre de modulations d'amplitude de basse fréquence de l'enveloppe du langage oral) peut être comparée à celle de la rééducation *Mod* (c'est à dire focaliser l'attention sur les transitions rapide du langage). Le programme *Sem* prétend également attirer l'attention sur le niveau phonémique en insérant de façon régulière des segments silencieux d'une

durée de phonèmes dans le flux du bruit blanc . Cependant ces silences ne coïncident pas nécessairement exactement au moment de production phonémique . Par ailleurs même si on pouvait techniquement s'assurer de la coïncidence temporelle entre la production phonémique et l'insertion du segment silencieux, l'attention ne serait pas attirée sur les variations rapides phonémiques puisqu'elles sont simplement signalées par un silence. Il se peut que l'un des deux programmes d'entraînement génère plus d'amélioration sur certaines tâches alors que l'autre en génère sur d'autres tâches. Dans ce cas, il sera nécessaire à l'avenir d'étudier une savante combinaison de ces deux rééducations, afin d'obtenir un effet bénéfique maximal. Afin de savoir s'il est utile de développer l'un ou l'autre de ces programmes, ils seront comparés ici au programme de rééducation Standard.

2.2.4 *La rééducation standard*

Le programme de rééducation *Stand* consiste en l'entraînement d'une importante variété de composantes impliquées dans la lecture et l'écriture. Aucun dispositif technique n'est utilisé (ni extraction d'enveloppe, ni présentation de parole modifiée). Les enfants sont soumis à des exercices au caractère académique ou pas, afin d'entraîner le langage oral (perception et production de sons, syllabes, mots, ...) et l'alphabétisation.

Dans la littérature, l'entraînement intensif a souvent été décrit comme étant plus efficace qu'un entraînement distribué sur l'année scolaire. L'entraînement intensif a été utilisé dans plusieurs types de rééducation de type phonologique [166, 336, 324, 349] et également avec des rééducations basées sur la parole modifiée [311, 116, 104, 102, 103, 89, 129, 320, 326, 4, 223]. Toutes ces études sont d'accord avec l'efficacité d'un entraînement intensif. C'est pourquoi, dans notre étude, une version intensive de l'entraînement en parole modifiée fut choisie car son efficacité en français n'avait été étudiée et montrée que dans le cas d'une rééducation intensive, bien que les deux autres rééducations soient étalées sur l'année scolaire.

Le premier but de ce projet de recherche est de déterminer laquelle des trois rééducations, lorsque leurs durées sont équivalentes en terme d'heures d'entraînement, est plus efficace que les autres, si elles interagissent différemment avec le langage oral ou l'alphabétisation, ou si elles sont aussi efficaces les unes que les autres.

2.3 CONTEXTE THÉORIQUE EN IMAGERIE CÉRÉBRALE

Le deuxième but de cette étude, au travers de l'imagerie cérébrale, est de savoir si les éventuels changements d'activité cérébrale dus aux rééducations se situent dans des aires (zones du cerveau) qui sont communément trouvées dans la littérature comme étant impliquées dans les processus de la lecture, c'est à dire les régions pariéto-temporale, occipito-temporale et frontale inférieure, toutes trois dans l'hémisphère gauche.

L'imagerie cérébrale nous permettra également de savoir si chacune des trois rééducations, avec leur spécificités propres, agissent différem-

ment au niveau cérébral, et si un lien peut être fait entre la modification de performances d'une rééducation donnée, et les changements cérébraux induits par cette même rééducation.

Il n'existe à ce jour aucune étude en imagerie cérébrale concernant la rééducation standard telle qu'elle est pratiquée en France, ni aucune étude sur la rééducation sémiophonique telle que nous nous proposons de l'appliquer dans cette étude. En revanche, plusieurs études d'imagerie cérébrale ont utilisé la technique de parole ralentie ou *FFW*. La majorité des études utilisent leur propre type de rééducation, qui porte en général sur un travail de type phonologique, du fait que le déficit phonologique est considéré comme crucial dans la littérature sur la dyslexie.

Aylward et collaborateurs [10] ont entraîné des enfants dyslexiques en conscience linguistique, en principe alphabétique et en compréhension de lecture pendant 28 heures. Ils trouvèrent que la quantité et le pattern des activations cérébrales chez ces enfants dyslexiques se rapprochaient, après rééducation, de ceux des enfants contrôles. Ils conclurent que le traitement amplifie les activations d'un circuit neuronal normalement impliqué dans les processus de langage.

Shaywitz et al. [266] utilisèrent une rééducation multimodale se focalisant principalement sur l'apprentissage explicite des principes alphabétiques. Ils obtinrent des résultats relativement proches de ceux de Aylward et al. mais eurent une interprétation un peu différente. Pour eux, ces changements d'activation cérébrale sont un reflet de la plasticité du système neuronale impliqué dans la lecture chez l'enfant. Ils conclurent que la rééducation apporte des changements significatifs et durables dans l'organisation cérébrale.

Temple et collaborateurs [319] utilisèrent la rééducation de type *FFW* (partiellement similaire à celle appliquée dans notre étude). L'activité cérébrale dans certaines régions du cerveau impliquées dans la lecture était significativement plus importante après rééducation, tendant à ressembler à celle des enfants contrôles. De plus, derrière ce processus de « normalisation » de l'activité cérébrale, certaines régions du cerveau dans l'hémisphère droit, régions qui ne sont normalement pas impliquées durant des tâches de lecture, connurent une augmentation d'activité. Les auteurs interprétèrent ce dernier résultat comme étant un processus de compensation par l'hémisphère droit, à cause de la « défaillance » de l'hémisphère gauche.

Plus récemment, Gaab et collaborateurs [94] créèrent la première étude révélant un réseau neuronal sensible à la rapidité de stimuli auditifs non-linguistiques chez des enfants contrôles, ainsi que son dysfonctionnement chez des enfants atteints de dyslexie développementale. Ce résultat avait déjà été montré chez l'adulte dyslexique [317]. Pour les auteurs, l'absence d'activations particulières chez les enfants dyslexiques pour des transitions sonores rapides pourrait traduire une surdité fonctionnelle aux différences entre transitions rapides et lentes chez les enfants dyslexiques. Parmi les aires cérébrales de ce réseau, N. Gaab indique notamment l'importance du cortex préfrontal gauche et du cortex frontal inférieur gauche dans le traitement des stimuli auditifs pour le langage. Après une r ducation de type *FFW*, les enfants dyslexiques eurent une augmentation d'activité cérébrale dans les aires présentes chez les enfants contrôles, notamment dans le gyrus frontal

inférieur gauche. De plus d'autres études ont montré une augmentation d'activité cérébrale dans cette zone pour des stimuli auditifs rapides versus des stimuli auditifs plus lents tels que la perception du début de la parole [17, 34, 88, 100, 137]. Enfin, il a été suggéré que le gyrus frontal inférieur gauche est spécifiquement engagé dans des processus phonologiques de haut niveau tels que la segmentation de parole continue en syllabes ou phonèmes [47, 224]. Les auteurs concluent que l'absence de réponse cérébrale aux transitions rapides auditives est potentiellement un facteur de risque chez les enfants atteints de dyslexie développementale, mais qu'une rééducation effective telle que FFW peut encourager la plasticité neuronale afin d'améliorer cette réponse aux transitions sonores rapides, ainsi que le langage et l'habileté à lire. Ils soulignent toutefois le fait que la rééducation FFW a pu améliorer ces deux dernières composantes via une évolution physiologique positive des mécanismes d'attention sélective.

Rares sont les études qui comparent en même temps plusieurs types de rééducation. Récemment, Richards et collaborateurs comparèrent une rééducation de type phonologique avec un entraînement visuo-spatial intense chez des enfants dyslexiques. Ils trouvèrent qu'après rééducation, les deux groupes de dyslexiques connurent une amélioration de performance significative sur les trois tâches proposées utilisant des pseudo-mots. De plus, bien que les deux types de rééducation produisirent des effets quelques peu différents en imagerie cérébrale, elles partagèrent un changement commun dans une zone somato-sensorielle. Les auteurs interprétèrent la similitude de l'amélioration entre les deux méthodes de rééducation comme montrant que la dyslexie développementale est multimodale et intègre aussi bien un déficit de type phonologique qu'un déficit de type traitement des informations visuelles rapides.

Ces deux théories (théorie du déficit de sensibilité aux transitions auditives rapides, et théorie du déficit visuel) qui peuvent apparaître au départ comme antinomiques pourraient expliquer, prises ensemble, les déficits d'ordre orthographique et phonologique. Différentes modalités de rééducation pourraient produire des améliorations comportementales équivalentes chez des enfants dyslexiques, ainsi que partager des effets communs sur des activations cérébrales.

Une autre interprétation possible est que n'importe quel type de traitement est susceptible d'améliorer les performances d'enfants dyslexiques tant que l'entraînement agit sur l'attention de l'enfant. Si cela est vrai, il ne devrait y avoir aucune différence entre les effets d'une rééducation de type phonologique, une de type sémiophonique et une de type en parole ralentie, telles que nous nous proposons de les étudier ici.

3.1 SUJETS RECRUTÉS

Tous les enfants qui furent recrutés dans cette étude avaient entre 8 et 11 ans et étaient scolarisés du CE1 au CM2. Le recrutement fut effectué à la consultation de l'hôpital pour enfants Robert Debré, Paris XIXème. Les critères d'inclusion étaient que l'enfant devait avoir comme langue maternelle le Français, avoir été élevé dans une famille parlant le Français, et il devait être scolarisé dans une école Française. De plus, les participants devaient n'avoir aucun déficit auditif, aucun déficit visuel non compensé, aucun autre déficit comportemental ou neurologique autre que la dyslexie (pas de déficit sévère attentionnel —vérifié cliniquement et avec les items du WISC-III [341]—, aucun déficit syntaxique —vérifié grâce au test ECOSSE [152]—, aucun déficit en production lexicale —vérifié grâce au test Deno100 [113]—, un score de QI supérieur à 80 — Vérifié grâce au test WISC-III [341], l'évaluation est faite par un psychologue, le même pour tous les enfants —). Tous les enfants furent examinés par un pédopsychiatre et par un neuro-pédiatre.

L'évaluation en lecture a été pratiquée par le même orthophoniste pour tous les sujets. Le test de lecture utilisé afin de poser un diagnostic de dyslexie est le test de l'« Alouette » [153] qui est, comme vu dans le premier chapitre, le test le plus utilisé pour diagnostiquer les enfants francophones. Dans ce test, 265 mots doivent être lus en moins de 3 minutes. Un score, appelé l'âge de lecture, est calculé en fonction du nombre de mots correctement lus et du temps pris pour lire le texte. Ce test est standardisé pour des enfants dont l'âge va de 8 à 12 ans. Quand le score indique plus de 18 mois de retard ou plus en lecture, l'enfant était inclus dans l'échantillon provisoire. La présence d'un déficit de conscience phonologique était ensuite recherchée (Batterie BELEC). Si l'enfant était déficitaire il était alors inclus définitivement dans l'échantillon.

Chaque enfant dyslexique fût aléatoirement affecté à l'une des trois méthodes de rééducation, en fonction de leur ordre de recrutement. Plus précisément, avant le recrutement, chacune des rééducations avait reçu aléatoirement 12 nombres différents compris entre 1 et 36 avec une seule contrainte : pas plus de trois numéros consécutifs ne peuvent être attribués à la même rééducation. Une fois qu'une rééducation avait reçu 12 numéros, elle était retirée de l'attribution des numéros. Quand un enfant était inclus, il recevait le numéro qui suivait exactement celui de l'enfant inclus juste avant lui.

Plusieurs enfants durent arrêter l'étude pour diverses raisons (divorce des parents, décision des parents d'arrêter l'étude), si bien qu'au total, 25 enfants achevèrent l'étude au lieu de 36 : 9 enfants suivirent la rééducation *Sem*, 9 autres la rééducation *Mod*, et 7 la rééducation *Stand* (voir Table 1).

Il est important de noter qu'un enfant français de 6 ans (en classe de CP), fait 45% de réponses correctes dans une tâche de suppression de phonème, alors qu'à l'entrée du CE1, un enfant de 7 ans obtient 98% de bonnes réponses. Cela montre que les enfants français, à l'instar

	SEM	MOD	STAND
Garçon/Fille	6G/3F	7G/2F	7G
Age moyen au premier test en mois(DS)	111.22 (13.44)	102.33 (10.64)	108.86 (9.97)
Age moyen au premier test en mois(DS)	126.33 (14.48)	109.67 (11.36)	124.86 (10.38)
Test de l'alouette (avant rééducation)			
Age réel moyen en mois(DS)	116 (10.8)	102 (39.2)	110,4 (9.7)
Age de lecture moyen en mois(DS)	83.2 (4.4)	81.4(1.4)	80.4 (3.4)
WISC(Avant rééducation)			
QI verbal moyen(DS)	96.3 (16.6)	102.3 (16.2)	89.3 (5.5)
QI de performance(DS)	99.1 (14.3)	102.8 (19.1)	91.3 (6.6)
QI total (DS)	98.3 (13.06)	102.7 (18.2)	89.3 (5.0)

TAB. 1: Caractéristiques des 3 groupes d'enfants dyslexiques. Le niveau socio-culturel est défini en utilisant la classification développée par Desrosières et Thèvenot (1983), qui prend en compte les revenus familiaux, la profession du père et le niveau éducatif de la mère. Avant rééducation, les scores de QI (Total, verbal et performance) de même que les âges de lectures n'étaient pas significativement différents (Anova à un facteur avec 3 groupes ; TQI : $F(2,22) = 1.6, p > .10$; VQI : $F(2,22) = 1.5, p > .10$; PQI ($F(2,22) = 1.0 p > .10$.)

des anglais, des italiens ou encore des allemands, ont un bon niveau d'analyse phonémique à la fin de leur première année d'apprentissage de la lecture [290]. Dans la présente étude, les enfants dyslexiques furent recrutés avec une scolarisation se situant entre le CE1 et le CM2. Ils avaient donc été exposés à plus de deux ans d'apprentissage de la lecture. Cinq enfants de l'échantillon ayant plus de 3 ans d'expérience en lecture avaient déjà reçu des séances de rééducation, avant leur inclusion. Ces rééducations étaient les suivantes : deux enfants attribués au programme *Sem* avaient reçu l'un un programme *Sem* avec deux séances de rééducation de 45 minutes par semaine pendant 6 mois, l'autre un programme *Stand* à raison d'une séance de 45 minutes par semaine pendant une année scolaire ; un enfant attribué au programme *Mod* avait reçu une séance de 45 minutes par semaine de rééducation *Stand* pendant 8 mois. Deux enfants attribués au programme *Stand* avaient reçu une rééducation *Stand* d'une séance de 45 minutes par semaine pendant 8 mois .

3.2 PROCÉDURE COMPORTEMENTALE

3.2.1 *Pré et post-test*

Une batterie de tests psycholinguistiques créée spécifiquement pour les enfants ayant des troubles de lecture, la batterie BELEC [197], fournit des données standardisées pour deux groupes : un groupe correspond au CE1 et au CE2, l'autre groupe correspond au CM1 et au CM2. Dans cette batterie, les enfants du CM1-CM2 sont les mêmes, suivis longitudinalement, que ceux testés en CE1-CE2. Cette procédure de test-retest fournit une bonne référence pour notre échantillon qui a également été testé deux fois (avant et après rééducation). Néanmoins, un contrôle additionnel fut effectué sur la procédure de test-retest en elle-même avec un écart de temps de un mois, afin de vérifier si le retest engendre une amélioration. Dans ce contrôle, 9 enfants dyslexiques scolarisés en CM1 furent testés et retestés un mois plus tard.

Procédure de test

Les enfants furent testés avant et après rééducation avec la batterie BELEC [197]. Le post-test fût effectué à peu près deux mois après la fin de la rééducation. L'intervalle de temps entre les deux tests était de 14, 4, et 14 mois , respectivement pour les rééducations *Sem*, *Mod* et *Stand*. Un post-test additionnel, un an après le premier post-test fût effectué sur un sous-groupe d'enfants.

La batterie Belec inclut :

- Deux tâches de mémoire verbale immédiate : une tâche de rappel immédiat de non-mots de type CV (20 items) et une tâche de rappel immédiat de non-mots de type CCV (20 items) .
- Quatre tâches de conscience phonologique : Inversion de syllabes (10 items) de pseudo-mots, inversion de phonèmes de non-mots (10 items), suppression de la consonne initiale dans des non-mots de type CCV (10 items), assemblage de sons (acronymes, 16 items).
- Cinq tâches de lecture : Mots fréquents (24 items), mots rares (24 items), mots réguliers (24 items), mots irréguliers (24 items), et non-mots (24 items).

C = Consonne
V = Voyelle

Le score brut d'un enfant pour une tâche donnée est le nombre de réponses correctes pour cette tâche.

3.2.2 Les programmes de rééducation

La rééducation par parole modifiée ou Mod

Le même algorithme de modification de la parole que celui utilisé par Merzenich [190] et Tallal [311] fût appliqué dans la présente étude. 2740 sons de paroles furent d'abord digitalisés et modifiés à trois niveaux de ralentissement : 14%, 31% ou 50%, conformément à la procédure décrite par Nagajaran, Wang, Merzenich, Schreiner, Johnston & Jenkins [201]. Les sons digitalisés ainsi que leurs modifications furent implémentés dans un logiciel de type jeu vidéo appelé Akoustiks [14]. Les exercices étaient de deux types : discrimination de contraste de sons de parole et discrimination de troncature. Tous les stimuli sont présentés auditivement.

LES TÂCHES DE CONTRASTE : Les sons étaient extraits d'une base de données Française de plus de 1000 sons de parole. Les exercices avec des voyelles incluent les 3 contrastes oral/nasal a/an, o/on, è/in, et 3 contrastes nasal/nasal. Les exercices avec des consonnes incluaient 9 contrastes voisés différents, 9 contrastes non-voisés, 5 contrastes différents voisé/non-voisé et deux autres sons de consonne tels que ill/gn et ill/l. Les exercices avec des groupes de consonnes incluaient les 9 contrastes suivants : bl/pl, gl/cl, vl/fl, tr/dr, br/gr, br/pr, br/tr, cr/tr et gr/cr.

La forme générale d'un exercice était la suivante. L'enfant est d'abord familiarisé avec les deux stimuli membres d'un contraste (par exemple /aba/ et /ada/) : quand l'un des stimuli est présenté (disons /aba/), une image clignote sur un côté de l'écran (disons sur la droite). Quand l'autre stimulus (ici /ada/) est présenté, une image clignote de l'autre côté de l'écran (ici à gauche). Chaque couple son-image est répété trois fois avec la même image, du même côté de l'écran à chaque fois. A la suite de cette familiarisation l'exercice commence : un membre de la paire de stimuli est présenté à l'enfant (disons par exemple /ada/) mais l'image associée précédemment n'est cette fois-ci pas montrée et l'enfant est informé qu'il doit appuyer sur le bouton qui correspond au côté de l'image qui était associée (ici, à gauche). Une fois que le bouton a été pressé, un jeton apparaît au bas de l'écran. La couleur du jeton indique à l'enfant si sa réponse était correcte ou non. Le jeton reste à l'écran après chaque essai, l'enfant est donc constamment informé de sa performance présente et passée dans l'exercice. La période durant laquelle l'enfant peut répondre est limitée : l'absence de réponse pendant le temps imparti est considéré comme une erreur. L'essai suivant est présenté automatiquement après l'apparition du jeton. Chaque membre d'une paire de stimuli est présenté plusieurs fois avec l'autre membre en ordre aléatoire. Le nombre d'essais est fixé au départ de l'exercice, ce nombre augmente progressivement, et le temps pour répondre diminue également de manière progressive quand l'enfant atteint un critère donné de réussite (généralement 80% d'essais réussis).

LES TÂCHES DE TRONCATURE : Pour ces tâches, des non-mots de 1, 2, 3, ou 4 syllabes sont utilisés. Les enfants devaient discriminer

deux stimuli. Pendant la période de familiarisation, un stimulus est présenté, suivi par la présentation d'une troncature, c'est à dire, d'une syllabe intacte du mot ou d'une syllabe modifiée (par exemple : le non-mot /radimu/ est suivi par /mu/ ou par /nu/). Chacune de ces deux formes est associée avec une image brève, apparaissant soit à gauche soit à droite de l'écran. Cette image apparaît à la fin de l'item tronqué. Les 6 essais de familiarisation utilisent 3 échantillons de stimuli différents et la place de la segmentation diffère également mais se concentre sur la même consonne, la même voyelle ou la même syllabe. Après cette période de familiarisation, l'exercice commence : l'enfant doit presser sur le bouton d'un côté quand l'item tronqué est modifié et de l'autre côté quand l'item tronqué n'est pas modifié.

L'enfant effectue lui-même une liste d'exercices préparés par l'orthophoniste après explication du fonctionnement des jeux. Chaque liste d'exercices prend environ 20 minutes pour être réalisée par l'enfant. Les réponses de chaque enfant ainsi que le temps mis pour répondre sont enregistrés et analysés afin de fournir des informations à l'orthophoniste quant à la performance de chaque enfant et ce, à chaque instant. La liste d'exercices qui devra être effectuée pendant les 20 minutes suivantes est déterminée en fonction des performances de la précédente liste. On présente d'abord à chaque enfant les stimuli de parole modifiée avec la vitesse la plus basse et un faible nombre d'items. L'enfant est entraîné avec cette vitesse jusqu'à ce qu'il arrive à 80% de bonnes réponses. Dès lors, le nombre d'items d'un exercice est augmenté. Quand l'enfant a de nouveau atteint 80% de bonnes réponses, les mêmes exercices sont représentés avec ralentissement de la parole plus faible, jusqu'à ce que, comme précédemment, l'enfant parvienne à 80% de bonnes réponses. Le nombre d'essais à effectuer est également augmenté progressivement afin d'encourager une vitesse d'exécution plus importante et une attention plus soutenue. Ceci dure jusqu'à ce que l'enfant arrive au même niveau de performance avec la vitesse la plus rapide (14% de ralentissement) et reste à ce niveau pour la catégorie d'exercice qui lui est soumis. Au sein de chaque niveau de ralentissement de parole, la difficulté des tâches est croissante. Le niveau de difficulté est déterminé grâce à une variété de contrastes de parole construits sur différentes séquences CV, VC, VCV, CVC, CVCVC, CCV, VCVCC, ... contrôlées grâce au logiciel VoCalex qui fournit un index statistique sur les similarités phonologiques entre les mots en langue Française [72].

Tous les enfants de ce groupe furent entraînés dans les mêmes locaux prêtés par le centre de psychopathologie pour les troubles d'apprentissage de l'enfant (Service du Professeur Mouren-Simeonio, Hôpital Robert Debré). Ils étaient pris en charge pour la journée. Durant cette journée, ils reçurent chacun sept périodes d'entraînement de 20 minutes chacun avec un ordinateur, plus à peu près 30 minutes par jour d'informations et d'explications, durant 5 jours par semaine et ce, pendant 4 semaines consécutives. Ceci constitue un total de 56 heures d'entraînement pour chaque enfant de ce groupe (dans le programme original FFW, 90 minutes par jour, 5 jours par semaine pendant 6 semaines sont conseillés, voir par exemple l'étude de Cohen et al. [59] Habib et collabo-

rateurs appliquèrent 120 minutes par jour, 5 jours par semaine pour 5 semaines consécutives [116]). Entre chacune des périodes d'entraînement de 20 minutes, l'enfant était autorisé à jouer ou à se reposer (chaque enfant disposait d'une chambre). Les enfants devaient aussi assister à des cours d'arithmétique et de grammaire durant deux périodes de 45 minutes au sein de l'école du département de l'hôpital et ce, avec un petit groupe d'autres enfants. Un total de 9 enfants fût assigné à ce groupe de rééducation. Les enfants ont suivi le programme par groupe de 3. Tous les enfants participèrent à l'étude durant la même période de l'année scolaire (le mois de juin et la première semaine de juillet). Le travail d'entraînement était assuré par un expert de la méthode, assisté par un orthophoniste. La procédure était limitée à l'entraînement en parole modifiée et aux exercices d'entraînement phonologique, et ne comprenait pas d'autres exercices (contrairement au programme FFW).

La rééducation de type Sémiophonique ou Sem

La rééducation sémiophonique s'étend le plus souvent sur deux ans. Néanmoins pour les besoins de la comparaison, elle a été réduite ici tout en conservant ses caractéristiques cruciales (de même le programme Mod est une réduction du FFW qui en conservait ses caractéristiques cruciales). Dans cette rééducation, les enfants sont entraînés à écouter une transposition de l'enveloppe sonore de la parole (voir ci-dessus). Cette enveloppe est créée comme suit. Un processus de changement de signal transforme la fréquence audio des sons de parole enregistrés en un nouveau signal. Le son fourni en entrée peut être modifié de manière « off-line » (des morceaux pré-enregistrés de parole ou de musique : mots, non-mots, phrases, narration, chanson, musique) ou de manière « on-line » (à partir de la parole de l'enfant ou de celle de l'orthophoniste). L'amplitude et/ou la fréquence du signal en sortie varie selon le logarithme de la fréquence et/ou de l'amplitude du son en entrée. Ce son en entrée est digitalisé (période d'échantillonnage d'environ 0.02 ms), puis filtré et traité par divers systèmes (dont un détecteur d'enveloppe). Il est enfin synthétisé et converti en un signal de sortie analogique qui peut être écouté. La fréquence minimale du signal de sortie est plus haute (4000 Hz) que la bande de fréquence de la parole (du moins pour les voyelles) et en est clairement distincte mais elle est toutefois plaisante à écouter. Le logarithme de la valeur de la fréquence du signal émis modulé est une fonction linéaire du logarithme de la valeur de l'amplitude de l'enveloppe filtrée du signal en entrée. L'amplitude perçue du signal de sortie dépend de la modulation de fréquence de l'émission. Des modulations lentes ou moyennes des fréquences des rythmes de la parole sont fournis dans ces stimuli, mais la parole n'est pas reconnaissable au sein de ces stimuli.

Le signal de sortie est envoyé à l'enfant grâce à un casque audio, donc l'enfant entend uniquement le son de sortie et pas le son d'entrée. Au début de l'entraînement, l'enfant écoute une variété de ces sons de sortie tout en dessinant ou en ne faisant rien. Dans une phase suivante de l'entraînement, l'enfant écoute à la fois le son en entrée et le son en sortie de manière successive (le signal en entrée correspond à des phrases ou des mots prononcés lentement et fortement articulés). Dans une troisième phase, les enfants écoutent le son en sortie (transformé depuis n'importe quel morceau de parole), ce son étant interrompu par

des silences de 500 ms à 1.5 s, engendrés par le système à des moments aléatoires. Le but de ces interruptions est de théoriquement focaliser l'attention auditive de l'enfant sur une durée d'évènements plus brève que celle de la syllabe. Mais comme nous l'avons vu plus haut ces interruptions ne peuvent pas être considérées comme attirant l'attention sur le niveau phonémique de la parole comme c'est le cas dans le programme Mod, puisqu'elles n'arrivent pas systématiquement à une frontière pertinente d'un segment phonémique. Dans une quatrième phase, l'enfant écoute le son modulé des mots et également leur version claire et doit les répéter. Enfin, dans une cinquième phase, l'enfant doit répéter les mots qu'il entend.

L'orthophoniste peut interférer à n'importe quel moment avec l'un ou l'autre des 3 qui sont entraînés en même temps.

Les enfants reçoivent trois séances de 45 minutes par semaine pendant 28 semaines pour un total de 84 séances. Chaque séance contient approximativement 40 minutes de travail, plus de l'information et des instructions, ce qui résulte en un total de 56 heures de travail.

Les séances de rééducation s'effectuèrent dans la même salle (hôpital de la Salpêtrière) et par les deux mêmes orthophonistes pour tous les enfants ; les orthophonistes avaient plusieurs années d'expérience avec cette méthode de rééducation. Les enfants furent entraînés trois par trois.

La rééducation standard ou [Stand](#).

Cette rééducation n'est jamais véritablement évaluée dans la mesure où les exercices qu'elle comporte évoluent avec les résultats des recherches sur la dyslexie, mais elle est considérée par les praticiens comme bénéfique. Il n'y a aucune séquence spécifique d'exercices. L'orthophoniste a à sa disposition un grand nombre d'exercices divers et variés qui entraînent sur différentes habiletés impliquées dans la lecture. Le praticien décide quoi faire et quand, selon les déficits de l'enfant. L'organisation rythmique, la segmentation de la parole, la conscience phonologique, le lexique, la sémantique, la connaissance grammaticale, la correspondance graphème-phonème sont autant de composantes qui sont entraînées (voir un échantillon d'exercices dans la [table 2](#)).

Les orthophonistes qui ont réalisé cette rééducation étaient d'âge similaire (âge similaire également avec les orthophonistes qui s'occupaient des autres rééducations), avec la même expérience professionnelle (autour de 5 ans d'expérience).

Les enfants reçurent 3 séances de 45 minutes par semaine, pour un total de 84 séances. Comme dans la rééducation [Sem](#), une séance de rééducation de 45 minutes contient 40 minutes de travail, résultant en un total de 56 heures. Contrairement aux deux autres programmes de rééducation, les enfants sont entraînés un par un par l'orthophoniste.

Le but de cette évaluation n'est pas d'innover avec la création d'un nouveau programme de rééducation, ni de comparer les programmes en entiers, tels qu'ils sont pratiqués. Le but est de comparer les caractéristiques de base de chacun des deux programmes [Mod](#) et [Sem](#) afin d'évaluer, à l'aide de période de rééducation équivalente en terme d'heures de travail, laquelle permet aux enfants dyslexiques de s'améliorer de manière la plus efficace, en prenant comme niveau contrôle d'amélioration, le niveau atteint par les enfants qui suivent le pro-

Exercices de métaphonologie par lecture et par dictée

- Segmentation de mots au sein d'une phrase, identification de mots dans un texte et les inclure dans une narration orale.
 - Décomposition rythmique d'un mot en ses syllabes (tapement du doigt en articulant les syllabes).
 - Modification de la première ou de la dernière syllabe d'un mot puis nomination de mots commençant ou finissant par les mêmes syllabes, ou trouver un intrus phonétique dans une liste.
 - Identification lexicale, discrimination entre deux mots d'une paire.
 - Apprentissage de la prononciation de lettres au sein d'un mot, taille d'un mot, relations entre la durée de prononciation d'un mot et la taille du dit mot.
 - Apprentissage de l'importance de la position séquentielle des mots dans une phrase, des syllabes dans un mot, des sons dans les syllabes.
 - Pratique de la séquentialité sur des objets non-verbaux.
 - Travail de la mémoire à court terme.
 - Travail de la conversion grapho-phonémique avec différentes actions (gestuelle, lecture, écriture)
- Pratique de la lecture.
- Apprentissage spécifique des mots irréguliers et des mots fonctionnels.
-

TAB. 2: Échantillon d'exercices de la rééducation standard

gramme de rééducation *Stand*. Si les rééducations *Mod* ou *Sem* n'ont pas la même efficacité, les résultats de la batterie BELEC doivent être différents de manière significative en post-test. Si ces deux programmes sont plus efficaces que la rééducation *Stand*, ils devraient donner de meilleurs résultats dans quelques items standardisés de la batterie BELEC. Si la rééducation *Sem* est d'efficacité égale à la rééducation *Mod* dans des tâches de la batterie BELEC, alors la spécificité (mais pas l'efficacité) de cette dernière pourra être remise en cause. Enfin, si la rééducation intensive *Mod* se révèle être aussi efficace que les deux autres, les familles se verraient offrir plus de choix dans le temps de rééducation.

3.3 PROCÉDURE D'IMAGERIE

Tous les enfants ne purent participer aux séances d'imagerie fonctionnelle en *IRMf*. Un enfant ne put rentrer dans le scanner à cause d'un appareil dentaire métallique inamovible. Un autre eut un appareil dentaire pendant la rééducation et ne put donc effectuer la séance *IRMf* post-rééducation. Trois familles refusèrent la séance d'imagerie en post-rééducation. Enfin, certaines données furent perdues, à cause d'un crash informatique à l'hôpital où eurent lieu les examens (Hôpital du Val-de-grâce, Paris).

Au total, l'échantillon de sujets en imagerie cérébrale fut composé de 23 sujets avant rééducation (9 dans le groupe *Sem*, 9 dans le groupe *Mod* et 5 dans le groupe *Stand*), et de 17 sujets après rééducation (9 dans le groupe *Sem*, 4 dans le groupe *Mod*, et 4 dans le groupe *Stand*). Chaque session d'*IRMf* se déroula comme suit. Chaque participant devait accomplir 5 tâches. Les tâches furent présentées dans l'ordre suivant : lecture de mots réguliers, lecture de mots irréguliers, lecture de pseudomots, discrimination auditive et enfin détection de rimes (en lecture).

Dans les trois premières tâches de lecture (la liste des mots utilisés figure en table 3, 4 et 5), les mots sont présentés sur un écran et peuvent être vus par l'enfant grâce à un système de miroirs. Les mots sont présentés un à un, pour une durée de 2545 ms chacun. Les mots ainsi que la durée de présentation furent choisis au sein de la batterie EVOLEC [287]. Au sein de chacune des tâches, l'enfant devait lire de manière silencieuse 4 listes de 11 mots chacune (donc 44 mots pour chacune des tâches). Au sein de chaque liste, les mots étaient présentés successivement. Chacune des 4 listes était présentée respectivement à partir de 28 s, 84 s, 140 s, et 196 s après le début du scan. Une période de 28 secondes de « repos » (c'est à dire sans mot présenté à l'écran) précédait chaque période de stimulation. Pendant ces périodes de « repos », une étoile est présentée à la position occupée par la première lettre de chaque mot. On demandait à chaque enfant de fixer cette étoile. Dans la deuxième tâche, chacune des 4 listes comportait quelques mots réguliers faciles à lire pour rassurer l'enfant.

Dans la quatrième tâche, celle de discrimination auditive, trois syllabes de type CV sont présentées successivement grâce à des écouteurs placés sur les oreilles de l'enfant. La troisième syllabe diffère ou non des deux autres par la consonne. L'enfant doit décider si cette troisième syllabe est identique aux deux autres ou pas. Tous les stimuli auditifs furent enregistrés avec la même voix et contrôlés en intensité sonore. La durée de présentation de chaque trio de syllabes est de 3111 ms. Quand l'enfant détecte une différence entre la troisième syllabe et les deux autres,

il a pour instruction de bouger très légèrement l'index droit. Le fait de bouger le doigt n'est que purement fictif, on ne porte aucune attention au fait que l'enfant entende bien une différence ou pas, cette instruction ne lui est donnée que pour focaliser son attention au maximum sur l'écoute des sons. Quatre listes de 9 trios furent présentées à chaque enfant (donc un total de 36 différents trios de sons). Durant toute cette tâche auditive, l'enfant devait fixer une étoile présentée à l'écran (les stimuli utilisés pour cette tâche sont listés en table 6).

Dans la cinquième tâche, la tâche de rimes (les mots utilisés pour cette tâche sont listés en table 7), deux mots sont présentés simultanément, l'un au dessus de l'autre et tous deux justifiés à gauche, pendant une période de 4000 ms. Les enfants devaient décider si les deux mots riment ou pas. De la même manière que les autres tâches, 4 listes de mots furent présentées aux enfants. Chaque liste contient 7 paires de mots, pour un total de 28 paires de mots. Lorsque l'enfant juge que les deux mots riment, il lui était demandé de bouger l'index droit (la raison est la même que pour la tâche de discrimination auditive).

Tout comme pour les autres tâches de lecture, les sessions d'acquisition pour la tâche de rimes et pour la tâche auditive contiennent quatre périodes de « repos » de 28 secondes alternées avec quatre périodes de stimulation de 28 secondes. Pendant les périodes de repos, les enfants devaient fixer une étoile positionnée au centre de l'écran.

En résumé, chaque sujet est soumis à 5 runs d'IRMf, chaque run étant composé de 4 périodes de stimulation-repos (appelés aussi « blocs »), un bloc pour chaque liste de mots/sons/paires de mots.

Les enfants étaient entraînés à lire silencieusement avant chaque séance d'imagerie. Ils étaient d'abord entraînés sur un écran d'ordinateur hors aimant avec plusieurs exemples de chacune des 5 conditions, puis entraînés dans l'aimant avec 1 seul essai de chaque condition (soit 5 essais) (les mots et les sons utilisés dans l'entraînement n'étaient pas réutilisés dans les conditions expérimentales). Les enfants avaient également eu l'occasion avant d'entrer dans l'aimant de voir une autre personne dans l'aimant et d'entendre le bruit de celui-ci. On leur avait également fait écouter un enregistrement de sons correspondant à une acquisition fonctionnelle. Pendant l'acquisition, après chaque tâche, ils étaient félicités grâce au casque audio et la consigne de la tâche suivante leur était à nouveau donnée. Une IRM anatomique était également acquise pour chaque enfant à la fin des acquisitions fonctionnelles.

La mère des enfants restait à proximité de l'aimant pendant les séances, avec une main sur la partie inférieure de la jambe de son enfant. Il lui était demandé de ne pas parler et de ne pas bouger sa main. La mère savait que le personnel pouvait voir l'enfant et lui communiquer des informations par les écouteurs. L'enfant ne pouvait pas voir sa mère. Les parents et l'enfant étaient prévenus avant l'acquisition qu'ils pourraient prendre une photographie à la fin de l'acquisition.

Données techniques de l'acquisition

L'IRM anatomique et l'IRMf furent acquises pour tous les participants sur un scanner SiemensTM ayant un aimant de 1.5 Tesla. Le premier set de scans fut acquis avant l'application du programme de rééducation et le second set après rééducation, avec un total de 10 runs IRMf (5 avant et 5 après) et 2 scans anatomiques (1 avant et 1 après). Pour les images BOLD, 64 volumes EPI furent acquis avec un TR de 3.98 secondes, et

Mots réguliers			
Liste 1	Liste 2	Liste 3	Liste 4
aile	mode	tasse	il
amande	pardon	roi	vase
duvet	une	echarpe	danse
parasol	sapin	table	rhyme
coton	mot	oncle	valise
boule	montre	porte	soupe
pomme	purée	fourmi	âne
sel	balais	poudre	papa
lit	plat	tache	passé
elle	malin	ballon	jupe
marmite	pépin	cheval	vélo

TAB. 3: Liste des mots utilisés dans la tâche de lecture des mots réguliers lors des sessions IRMf. Ces mots proviennent de la batterie EVOLEC [287].

des voxels d'une taille de 4x4x5 mm, pour un total de 15 coupes allant de $Z=-35$ à $Z=35$ (Coordonnées de Talairach).

Les pré-traitement des images ainsi que les analyses statistiques furent effectuées avec le logiciel SPM5. Les scans provenant des sessions IRMf furent corrigés pour le mouvement, recalés avec l'IRM anatomique, puis normalisés dans l'espace de Talairach, et enfin lissés avec un filtre gaussien (FWHM de 8X8X8 mm). Tous les contrastes furent estimés à l'aide de la fonction Hemodynamic response function (HRF).

Mots irréguliers			
Liste 1	Liste 2	Liste 3	Liste 4
dix	scie	six	pied
faon	pays	écho	merci
fragile	agité	paille	caillou
ongle	guide	poêle	buffle
femme	feuille	peur	accident
cuisine	aquarium	magie	septième
automne	baptême	seconde	orchestre
chasse	sculpture	maximum	technique
aiguille	condamné	cinéma	monsieur
compte	deuxième	piscine	bistrot
ennui	chouette	douceur	soleil

TAB. 4: Liste des mots utilisés dans la tâche de lecture de mots irréguliers lors des sessions IRMf. Ces mots proviennent de la batterie EVOLEC [287]. cette liste de mots irréguliers contient quelques mots réguliers, afin de fournir quelques stimuli moins stressant.

Pseudo-mots			
dul	plou	opha	puldir
tirbul	blutir	oude	moube
enoure	écine	poibe	traillou
opaurir	pirche	mocile	nacide
tibulo	butiro	pudiro	dipulo
oume	acribion	siliène	sartopin
cuifle	bartome	pogide	orphade
funve	scaltoure	durche	tainouque
égibe	couciron	dirpul	évaloupe
onfre	cande	toupre	supon
frante	chaful	conde	chile

TAB. 5: Liste des mots utilisés dans la tâche de lecture de pseudo-mots lors des sessions IRMf. Ces mots proviennent de la batterie EVOLEC [287].

Liste 1	Liste 2	Liste 3	Liste 4
ta ta da	bi bi pi	to to do	ra ra ra
va va fa	mi mi li	fo fo fo	sa sa cha
ja ja ja	si si si	vo vo po	bra bra pra
sa sa fa	di di ti	mo mo lo	fa fa va
pro pro pro	pu pu bu	re re le	ti ti di
go go ko	chu chu ju	du du tu	fi fi si
po po vo	tu tu du	ju ju su	vi vi fi
so so cho	fu fu fu	bu bu bu	ji ji ji

TAB. 6: Liste des sons utilisés dans la tâche de discrimination auditive lors des sessions IRMf.

	Liste 1	Liste 2	Liste 3	Liste 4
Paire 1	tube	rien	tour	glace
	aube	sien	sourd	tasse
Paire 2	foule	vent	taille	seau
	boule	fin	paille	sot
Paire 3	mont	ours	six	froid
	son	poux	scie	droit
Paire 4	ville	pluie	chien	bise
	bille	nuit	foin	riz
Paire 5	robe	pousse	bouche	pion
	role	pouce	touche	rien
Paire 6	or	trait	chaise	teint
	pleurs	prêt	laisse	fin
Paire 7	bois	femme	gene	boîte
	toit	flamme	veine	ouate

TAB. 7: Liste des mots utilisés dans la tâche de rimes lors des sessions IRMf. Ces mots proviennent de la batterie EVOLEC [287].

4.1 RÉSULTATS COMPORTEMENTAUX

Le nombre moyen de réponses correctes dans chaque tâche de la batterie BELEC à la session 1 (avant rééducation) et à la session 2 (après rééducation) figurent dans la table 8, de même que le pourcentage d'augmentation de bonnes réponses de la session 1 à la session 2. Le nombre de réponses correctes donne une vue globale de l'amélioration des performances.

Parce que l'attribution aléatoire des sujets au sein des 3 groupes résulte en une répartition inégale des âges et des classes scolaires par groupe de rééducation, les analyses comparant les groupes et les tâches se doivent d'être effectuées sur les scores après une calibration relative aux scores contrôles des enfants du même niveau scolaire. Les scores furent donc calibrés par référence au niveau scolaire de chaque participant. La batterie BELEC a été construite avec deux groupes contrôles. La moitié du groupe le plus jeune est du niveau du CE1 et l'autre moitié du CE2. La moitié du groupe le plus vieux (ce sont les mêmes enfants que le groupe jeune, mais retestés un an plus tard) sont du niveau CM1, et l'autre moitié du niveau CM2. Un score calibré pour chaque enfant dyslexique pour chaque tâche a été calculé comme suit :

$$\frac{\text{Score_moyen_contrôle} - \text{Score_de_l'enfant}}{DS_contrôle}$$

Pour chacune des sessions 1 et 2, les scores ont été calibrés avec la moyenne et la DS du groupe contrôle correspondant à son niveau de référence lors de la session 1. Le score calibré résultant fournit la distance entre le score d'un enfant dyslexique donné et le score moyen de son groupe contrôle correspondant pour une tâche donnée avant et après rééducation. Un score calibré qui décroît dans une tâche de la session 1 à la session 2, tendant vers zéro ou devenant négatif, indique que la distance entre la performance de l'enfant et le niveau de son groupe contrôle décroît relativement au niveau de référence de la session 1. Les scores calibrés gomment les différences de performance dues aux différences de niveau scolaire.

Un autre type de score calibré, le score calibré « évolutif », a été calculé afin de détecter si un enfant dyslexique rattrape le niveau contrôle correspondant à la classe dans laquelle il est lors de la session 2.

Les scores de la session 2, plutôt que d'être calibrés par rapport à la référence de la session 1, sont calibrés relativement au niveau contrôle correspondant au niveau scolaire après rééducation. Les enfants qui étaient en CE1 à la session 1 et en CE2 à la session 2 avaient la même moyenne contrôle pour les deux sessions ; de manière similaire, les enfants qui étaient au CM1 à la session 1 et au CM2 à la session 2 gardent le même score moyen contrôle (2 enfants de la rééducation *Sem*, 2 enfants de la rééducation *Mod*, et 3 enfants de la rééducation *Stand* eurent le même score moyen contrôle entre les sessions 1 et 2). Pour les 18 autres enfants, la moyenne contrôle changea entre la session 1 et la session 2. Ce système de score signale si l'amélioration des performances entre

Ce type de formule donne ce qu'on appelle un Z-score, ce qui peut être vu comme la « distance » du score obtenu par rapport au score contrôle

SESSION	TÂCHE	SCORE MOYEN	DS
<i>Répétition immédiate</i>			
Session 1	CV	14.8	2.598
	CCV	7.36	2.531
Session 2	CV	17.28	2.092
	CCV	9.44	3.097
<i>Métaphonologie</i>			
Session 1	Syll. Inv.	5.86	2.361
	Phon. Inv.	4.06	2.6
	Init C cancel	2.24	2.916
	Blending	4.72	3.8624
Session 2	Syll. Inv.	7.5	2.151
	Phon. Inv.	6.6	2.255
	Init C cancel	5.56	3.809
	Blending	8.4	4.619
<i>Lecture de mots</i>			
Session 1	Frequent	16.24	4.675
	Rare	13.36	4.545
	Pseudo	9.84	3.275
	Régulier	15.84	4.1
	Irrégulier	9.12	4.549
Session 2	Frequent	20.48	3.5954
	Rare	17.16	4.2
	Pseudo	14.24	4.594
	Régulier	19.04	3.9
	Irrégulier	13.4	5.664

TAB. 8: Moyenne des scores bruts des réponses (avec les déviations standards correspondantes) aux tests du BELEC pour les sessions 1 et 2.

la session 1 et 2 correspond en plus à un rattrapage du niveau des normolecteurs. Par contraste, progresser de la même manière que les contrôles, tout en restant à la même distance (pas d'augmentation ou de diminution de score) sera révélé par une distance constante entre les performances des dyslexiques et des contrôles dans les sessions 1 et 2. Les MANOVA effectuées sur les scores calibrés et sur les scores calibrés évolutifs ont toutes la même structure : 3 Groupes de rééducation X 2 Sessions X n Tâches, avec la session et la tâche comme mesure répétée. Quand le facteur "Tâche" est répété plus de deux fois, la correction de Greenhouse-Geisser a été utilisée. Dans ce cas la valeur corrigée de p est donnée.

4.1.1 Analyse des tâches de lecture en fonction de la fréquence des mots

Dans les 3 tâches de lecture variant selon la fréquence des mots (3 Groupes X 2 Sessions X 3 Tâches)(table 9) la MANOVA faite sur les scores calibrés confirme que les performances augmentent significativement de la session 1 à la session 2 ($F(1,22) = 143.687, p < .00001$). La différence entre les groupes n'est pas significative ($F(2,22) = 1.38, p > .10$). Ni les interactions Session X Groupe et Session X Tâche ni la triple interaction ne sont significatives. Toutefois l'interaction Tâche X Groupe est significative ($F(2,44) = 3.589, p < .05$). D'autres analyses montrent que cette interaction est en fait due aux scores très faibles des enfants du groupe *Stand* en lecture de mots fréquents (table 11). Dans cette tâche, le score des enfants du groupe *Stand* est significativement plus faible que celui des enfants du groupe *Mod* ($F(1,22) = 5.278, p < .05$) et marginalement plus faible que celui des enfants du groupe *Sem* ($F(1,22) = 3.695, p < .0067$). La difficulté de la tâche s'ordonne différemment selon les groupes. Les enfants du groupe *Stand* montrent un score calibré plus faible en lecture de mots fréquents qu'en lecture de mots rares et de non-mots ($F(1,22) = 7.980, p < .01$; $F(1,22) = 5.419, p < .05$, respectivement). Alors que dans les deux autres groupes de rééducation, *Sem* et *Mod*, les enfants ne montrèrent aucune différence de score entre les tâches.

Afin de vérifier si l'interaction Tâche X Groupe est liée à un effet différentiel des programmes de rééducation ou si elle était présente dès la session 1 avant rééducation, une MANOVA fut calculée sur les scores calibrés à la session 1 seulement. Le facteur Tâche était significatif ($F(2,44) = 3.605, p < .05$), montrant que les performances de lecture de mots fréquents tendent à être significativement plus distantes que celles de la lecture de mots rares, par rapport aux performances contrôles. La performance en lecture de mots rares était significativement plus proche des contrôles que la performance en lecture de non-mots (Fréquent VS Rare : $F(1,22) = 5.746, p < .05$; Rare VS Non-mots : $F(1,22) = 6.071, p < .05$). L'interaction Tâche X Groupe était aussi significative ($F(4,44) = 2.656, p < .05$). Dans la tâche de lecture de mots fréquents, les enfants du groupe *Stand* tendent à être moins performants que ceux du groupe *Mod* ($F(1,22) = 4.208, p = .052$) mais ne diffèrent pas des performances des enfants du groupe *Sem* ($F(1,22) = 3.231, p = .08$). Le pattern de performance aux trois tâches est différent dans le groupe *Stand* : les scores sont significativement plus faibles pour la lecture de mots fréquents que pour la lecture de mots rares ($F(1,22) = 6.567, p < .05$) et que pour la lecture de non-mots ($F(1,22) = 6.226, p < .05$). En revanche,

dans chacun des deux autres groupes on n'observe pas de différence significative entre les tâches. Ceci montre que le groupe *Stand* a tendance à être moins performant avant entraînement pour la lecture des mots réguliers dès avant rééducation. On ne peut attribuer la faiblesse de ses performances en post rééducation à la rééducation elle-même.

Les analyses des scores calibrés évolutifs ne révèlent aucune différence entre la session 1 et la session 2 dans la tâche de lecture de mots selon la fréquence ($F(1,22) = 0.149, p > .10$) (table 9). Aucune interaction avec le facteur Session n'a été trouvée. Aucune différence entre les groupes de rééducation n'était significative. Le facteur Tâche et l'interaction Tâche X Groupe sont tous deux significatifs ($F(2,44) = 5.448, p < .01$; $F(4,44) = 2.869, p < .05$, respectivement), montrant le même effet que pour les scores calibrés. Les enfants du groupe *Stand* sont moins performants en lecture de mots fréquents que pour les autres mots, alors que les deux autres groupes ne montrent pas de différence. La non significativité de l'interaction Session X Groupe X Tâche confirme que l'effet ne résulte pas des performances post entraînement mais est bien présent aussi bien en pré entraînement qu'en post entraînement.

En résumé, les analyses des scores calibrés montrent qu'une amélioration équivalente est présente au sein des trois groupes de rééducation dans toute les tâches de lecture et révèlent que la différence entre les groupes provient de la basse performance des enfants du groupe *Stand* à la session 1. Les scores calibrés évolutifs ne montrent aucune amélioration ou détérioration de performance, démontrant que le niveau d'amélioration des enfants dyslexiques est parallèle à ceux des contrôles, sans les rattraper ni s'en éloigner plus.

4.1.2 Analyse des tâches de lecture en fonction de la régularité des mots

Dans les tâches de lecture variant selon la régularité des mots (voir table 10), l'amélioration de la session 1 à la session 2 est significative ($F(1,22) = 39.57, p < .00001$). Ni le facteur Groupe, ni les interactions Session X Groupe et Tâche X Session X Groupe ne sont significatives. Le facteur Tâche est significatif ($F(1,22) = 19.907, p < .0005$). Les interactions Session X Tâche et Groupe X Tâche ne sont pas significatives. Les scores calibrés révèlent un niveau de performance plus faible pour les mots réguliers que pour les mots irréguliers. Ceci reflète le fait que le niveau de performance étant faible pour les mots irréguliers chez les contrôles, les enfants dyslexiques demeurent peu éloignés de ces derniers alors qu'ils en sont clairement éloignés pour les mots réguliers.

L'analyse des scores calibrés évolutifs ne montre aucune différence entre la session 1 et la session 2 ($F(1,22) = 3.534, p > .10$). Aucune interaction avec le facteur Session n'est significative.

De même, le facteur groupe n'est pas significatif ($F(2,22) = 0.164, p > .10$) et aucune interaction avec ce facteur n'est significative. La significativité du facteur Tâche confirme l'effet décrit pour les scores calibrés : la distance entre les performances des enfants dyslexiques et les moyennes contrôles est plus grande pour les mots réguliers que pour les mots irréguliers ($F(1,22) = 13.136, p < .005$). Cet effet provient du bas niveau des performances contrôles avec les mots irréguliers. En

Tâche	Fréquent		Rare	
	Sess. 1 Score calib.	Sess. 2 $\frac{\text{Score_calib.}}{\text{Score_evol.}}$	Sess. 1 Score calib.	Sess. 2 $\frac{\text{Score_calib.}}{\text{Score_evol.}}$
Sem	1.85 (2.14)	0.37 (1.29)	1.20 (1.20)	0.53 (1.14)
		1.96 (2.95)		1.54 (1.43)
Mod	1.62 (1.60)	0.07 (1.00)	1.66 (0.91)	0.40 (1.05)
		1.72 (2.60)		1.66 (1.87)
Stand	3.45 (1.42)	1.49 (1.41)	2.25 (1.35)	0.89 (1.20)
		3.80 (3.79)		1.91 (2.06)
Non-mots				
	1.99 (0.92)	0.75 (1.26)		
		1.27 (1.33)		
	1.94 (0.79)	0.83 (1.42)		
		1.53 (1.82)		
	2.22 (0.96)	1.09 (1.01)		
		1.68 (1.47)		

TAB. 9: Scores de lecture selon la fréquence des mots. Moyennes des scores calibrés, des scores calibrés évolutifs et les déviations standards correspondantes. La colonne « Session 1 » montre les scores calibrés par rapport aux scores contrôles à la session 1. La colonne nommée « Session 2 » montre les scores calibrés sur la ligne supérieure (Scores de la session 2 calibrés par les scores contrôles de la session 1) et les scores calibrés évolutifs sur la ligne inférieure (Scores de la session 2 calibrés par les scores contrôles de la session 2). Les scores sont affichés pour chaque catégorie de mots, chaque session, chaque groupe.

Tâche	Réguliers		Irréguliers	
	Session 1 Score calib.	Session 2 $\frac{\text{Score_calib.}}{\text{Score_evol.}}$	Session 1 Score calib.	Session 2 $\frac{\text{Score_calib.}}{\text{Score_evol.}}$
Sem	2.39 (3.08)	0.71 (1.77)	1.038(1.59)	0.04 (1.65)
		4.85 (6.00)		1.52 (1.43)
Mod	2.11 (1.84)	0.97 (1.46)	1.057 (1.09)	0.28 (1.37)
		3.38 (3.00)		1.90 (1.54)
Stand	3.203 (1.96)	1.49 (1.42)	1.838 (1)	0.34 (1.22)
		4.13 (4.55)		1.75 (2.42)

TAB. 10: Scores de lecture des mots réguliers et irréguliers. Moyennes des scores calibrés, des scores calibrés évolutifs et les déviations standards correspondantes. La colonne « Session 1 » montre les scores calibrés par rapport aux scores contrôles à la session 1. La colonne nommée « Session 2 » montre les scores calibrés sur la ligne supérieure (Scores de la session 2 calibrés par les scores contrôles de la session 1) et les scores calibrés évolutifs sur la ligne inférieure (Scores de la session 2 calibrés par les scores contrôles de la session 2). Les scores sont affichés pour chaque catégorie de mots, chaque session, chaque groupe.

Tâche	CV		CCV	
	Session 1 Score calib.	Session 2 $\frac{\text{Score calib.}}{\text{Score evol.}}$	Session 1 Score calib.	Session 2 $\frac{\text{Score calib.}}{\text{Score evol.}}$
Sem	0.27 (0.59)	0.51 (0.62)	1.36 (1.34)	0.12 (1.22)
		0.54 (0.57)		0.001 (1.17)
Mod	0.72 (0.83)	0.27 (0.69)	0.77 (0.68)	0.20 (1.30)
		0.32(0.63)		0.29 (1.26)
Stand	0.40 (1.05)	0.03 (0.62)	0.82 (0.89)	0.54 (1.14)
		0.07 (0.59)		0.59 (1.09)

TAB. 11: Scores aux tâches de répétition de non-mots. Moyennes des scores calibrés, des scores calibrés évolutifs et déviations standards correspondantes. La colonne « Session 1 » montre les scores calibrés par rapport aux scores contrôles à la session 1. La colonne « Session 2 » montre les scores calibrés sur la ligne supérieure (Scores de la session 2 calibrés par les scores contrôles de la session 1) et les scores calibrés évolutifs sur la ligne inférieure (Scores de la session 2 calibrés par les scores contrôles de la session 2). Les scores sont affichés pour chaque catégorie de mots, chaque session, chaque groupe.

résumé, les enfants dyslexiques s'améliorent entre les sessions, mais ne parviennent pas à rattraper le niveau contrôle.

4.1.3 Analyse des tâches de répétition immédiate de non-mots

Dans ces deux tâches (table 11) l'analyse des scores calibrés montre une amélioration significative de la session 1 à la session 2 ($F(1,22) = 25.615, p < .0001$). Il n'y a aucune différence significative entre les groupes de rééducation ($F(1,22) = 0.199$). L'interaction Session X groupe n'est pas significative non plus ($F(1,22) = 2.092$). De plus, ni l'interaction Groupe X Tâche, ni la triple interaction ne sont significatives. Les performances dans la tâche CCV sont significativement plus distantes des moyennes contrôles que les performances obtenues dans la tâche CV ($F(1,22) = 6.419, p < .02$). L'interaction Session X Tâche n'est pas significative.

L'analyse des scores calibrés évolutifs montre que les enfants tendent (table 11) à rattraper le niveau contrôle, en affichant une amélioration significative entre les sessions ($F(1,22) = 25.934, p < .00005$). Le facteur Groupe n'est pas significatif, et l'interaction Session X Groupe n'est pas significative non plus. Par contre, le facteur Tâche est quant à lui significatif, montrant que la distance entre les enfants dyslexiques et les contrôles est plus petite dans la tâche CV que dans la tâche CCV ($F(1,22) = 9.199, p < .007$). Aucun autre effet n'est significatif.

4.1.4 Analyses des tâches métaphonologiques

Dans les trois tâches de type métaphonologique, les scores calibrés montrent une amélioration significative entre la session 1 et la session 2 ($F(1,22) = 57.368, p < .000001$) (voir table 12 et 13), avec aucune différence

entre les trois groupes de rééducation, et une interaction Session X Groupe non significative.

Le facteur Tâche est significatif ($F(2,44) = 11.571, p = 0.00013$) montrant des scores plus faibles dans la tâche de suppression de consonne que dans la tâche d'inversion phonémique et dans la tâche d'inversion de syllabes. L'interaction Session X Tâche n'est pas significative ($F(2,44) = 2.581, p > .09$). L'interaction Tâche X Groupe est significative ($F(4,44) = 4.562, p = .0047$). Les groupes de rééducation ne diffèrent pour aucune des tâches, cependant, l'ordre de difficulté des tâches est différente entre les groupes. L'ordre moyen de difficulté des tâches est présent dans le groupe *Sem* (Inversion de syllabes VS inversion de phonèmes : $F(1,22) = 4.839, p < .05$; Inversion de syllabes VS deletion de consonne : $F(1,22) = 24.485, p < .0001$; Inversion de phonèmes VS deletion de consonne : $F(1,22) = 8.234, p < .01$). Comme pour le groupe *Sem*, le niveau de performance du groupe *Stand* pour la tâche d'inversion de syllabe est plus élevé que pour les deux autres tâches (Inversion de syllabe VS Inversion de phonèmes : $F(1,22) = 10.071, p < .005$; Inversion de syllabes VS suppression de consonne : $F(1,22) = 9.315, p < .005$). Par contre, au contraire du groupe *Sem*, les performances dans la tâche de deletion de phonèmes ne diffèrent pas significativement de celles observées dans la tâche de deletion de consonne. Finalement, contrairement aux autres groupes, le groupe *Mod* ne montre aucune différence significative entre les différentes tâches métaphonologiques.

La non significativité de l'interaction Session X Groupe X Tâche suggère que la différence de performance entre les groupes de rééducation en fonction des tâches est liée à une différence constante entre les sessions dans les tâches métaphonologiques entre les groupes plutôt qu'à un effet différentiel des programmes de rééducation. Une MANOVA effectuée sur les données de la session 1 montre que la différence entre les tâches est présente avant la rééducation ($F(2,44) = 13.583, p = .00004$), sans effet de groupe ($F(2,22) = 0.983, p > .10$), et une interaction Tâche X Groupe significative ($F(4,44) = 3, p = .033$). Dans le groupe *Sem*, le niveau de performance est plus élevé pour la tâche d'inversion de syllabes que pour la tâche d'inversion de phonème et la tâche de suppression de consonne ($F(1,22) = 5.586, p < .05$; $F(1,22) = 30.09, p < .00005$, respectivement); le niveau de performance est significativement plus élevé dans la tâche d'inversion de phonème que dans la tâche de suppression de consonne ($F(1,22) = 4.735, p < .05$). Dans le groupe de rééducation *Stand*, la performance est plus élevée pour la tâche d'inversion de syllabes que pour les deux autres tâches ($F(1,22) = 9.5, p < .01$; $F(1,22) = 13.463, p < .005$, respectivement). Aucune différence significative ne fût trouvée entre les tâches pour le groupe de rééducation *Mod*.

Les scores calibrés évolutifs montrent que les scores des enfants dyslexiques ne rattrapent pas les scores contrôles (Facteur de session : $F(1,22) = 0.164, p > .10$) (table 12 et 13). Aucune interaction avec le facteur Session n'est significative. Le facteur Groupe n'est pas significatif ici. Le facteur Tâche et l'interaction Tâche X Groupe sont significatifs ($F(2,44) = 12.651, p < .00005, F(4,44) = 4.653, p < .005$, respectivement). L'analyse de cette interaction montre le même pattern que pour les scores calibrés. Effectivement, l'interaction Session X Groupe X Tâche n'est pas significative, montrant que les différences de performance ne résultent pas de l'effet des programmes de rééducation mais de la différence déjà

Tâche	Syllabe Inv.		Phonème Inv.	
	Session 1 Score calib.	Session 2 $\frac{\text{Scorecalib.}}{\text{Scoreevol.}}$	Session 1 Score calib.	Session 2 $\frac{\text{Scorecalib.}}{\text{Scoreevol.}}$
Sem	1.52 (2.23)	0.79 (1.84)	3.5 (3.12)	1.87(2.27)
		2.00 (1.73)		3.22 (2.11)
Mod	2.46 (3)	1.77 (3.18)	2.41 (0.82)	1.19(1.01)
		3.47 (2.89)		2.78 (1.71)
Stand	2.32 (2.35)	0.377 (0.90)	5.24 (2.41)	2.46 (3.16)
		1.18 (0.69)		3.86 (3.39)

TAB. 12: Scores aux tâches de métaphonologie. Moyennes des scores calibrés, des scores calibrés évolutifs et déviations standards correspondantes. La colonne « Session 1 » montre les scores calibrés par rapport aux scores contrôles à la session 1. La colonne « Session 2 » montre les scores calibrés sur la ligne supérieure (Scores de la session 2 calibrés par les scores contrôles de la session 1) et les scores calibrés évolutifs sur la ligne inférieure (Scores de la session 2 calibrés par les scores contrôles de la session 2). Les scores sont affichés pour chaque catégorie de mots, chaque session, chaque groupe.

présente avant rééducation.

Pour résumer, les scores calibrés et les scores calibrés évolutifs montrent une amélioration significative, sans toutefois de tendance à rattraper le niveau des contrôles en session 2.

La quatrième tâche métaphonologique, le mixage de sons, ne comportant pas le même nombre d'items que les trois autres, est analysée séparément. Dans cette tâche, les scores calibrés montrent une amélioration de performance entre la session 1 et la session 2 ($F(1,22) = 16.272$, $p < .001$) (table 13). Ni le facteur Groupe ni l'interaction Session X groupe ne sont significatives ($F(1,22) = 0.14$; $F(1,22) = 0.572$, respectivement). Aucun autre facteur ou interaction n'est significatif. L'analyse des scores calibrés évolutifs ne montre aucun facteur ou interaction significatif.

4.1.5 Bilan des analyses de tâches

En résumé, les scores calibrés montrent une amélioration significative à la session 2 comparativement à la session 1, pour les trois groupes de rééducation et pour toutes les tâches (5 de lecture, 2 de répétition immédiate, 4 métaphonologiques). Les scores standardisés en relation avec les niveau scolaire des enfants en session 1 ne révèlent aucune différence d'effets entre les programmes de rééducation en terme d'amélioration, et ce, sur aucune des tâches. Le désavantage des enfants du groupe *Stand* comparativement aux enfants des deux autres groupes sur la tâche de lecture de mots fréquents apparaît comme étant due au niveau faible des enfants composant ce groupe avant le début de la rééducation.

L'ordre de difficulté des trois tâches métaphonologiques diffère selon

Tâche	Deletion de C.		Mixage de sons	
	Session 1 Score calib.	Session 2 $\frac{\text{Scorecalib.}}{\text{Scoreevol.}}$	Session 1 Score calib.	Session 2 $\frac{\text{Scorecalib.}}{\text{Scoreevol.}}$
Sem	5.16 (2.65)	3.29 (3.44)	3.3 (1.51)	1.40 (1.88)
		5.78 (3.96)		2.16 (2.46)
Mod	3.13 (3.23)	0.93 (1.89)	2.98 (1.44)	1.88 (1.55)
		2.69 (3.32)		2.89 (2.28)
Stand	5.08 (2.21)	2.35 (2.31)	2.93 (1.58)	1.73 (1.64)
		4.21 (3.79)		2.52 (2.27)

Tab. 13: Scores aux tâches de métaphonologie(suite). Moyennes des scores calibrés, des scores calibrés évolutifs et déviations standards correspondantes. La colonne « Session 1 » montre les scores calibrés par rapport aux scores contrôles à la session 1. La colonne « Session 2 » montre les scores calibrés sur la ligne supérieure (Scores de la session 2 calibrés par les scores contrôles de la session 1) et les scores calibrés évolutifs sur la ligne inférieure (Scores de la session 2 calibrés par les scores contrôles de la session 2). Les scores sont affichés pour chaque catégorie de mots, chaque session, chaque groupe.

les groupes de rééducation. Nous avons montré que ce phénomène est lié aux performances de la session 1. Les programmes de rééducation résultent en l'amélioration des performances dans ces tâches, pourtant l'ordre de difficulté reste inchangé de la session 1 à la session 2.

Ces résultats montrent que les enfants des trois groupes de rééducation s'améliorent de manière analogue, relativement à leur niveau de départ. De plus, aucune différence n'est observée entre les 3 programmes de rééducation tant sur le plan de l'amélioration générale que de la sensibilité aux différentes tâches. Additionnellement, les enfants montrent une amélioration de performance parallèle à l'amélioration des scores contrôles dans les tâches de lecture et les tâches métaphonologiques. Les enfants dyslexiques ne rejoignent le niveau des scores contrôles après rééducation que dans la tâche de répétition immédiate de non-mots.

4.1.6 Le rôle de l'école et de la maturation

Au vu de la différence temporelle entre la session 1 et la session 2, il apparaît nécessaire de vérifier si l'expérience spontanée et la maturation pourraient expliquer l'amélioration de performance entre la session 1 et la session 2. Pour se faire, deux comparaisons furent effectuées entre les performances des enfants dyslexiques les plus jeunes et les performances des enfants les plus âgés.

Le nombre de réponses correctes à la session 2 des enfants jeunes fut comparé au nombre de réponses correctes à la session 1 des enfants les plus âgés. Les participants furent divisés en deux groupes conformément à leur âge à la session 1. Douze enfants composèrent le groupe des enfants vieux (âgés de 112 à 131 mois à la session 1, 5 provenant du groupe *Sem*, 3 provenant du groupe *Mod*, et 6 provenant du groupe *Stand* et treize enfants furent attribués au groupe jeune (âgés de 87 à 106 mois à la session 1). Au moment de la deuxième session, ces enfants du groupe jeune étaient âgés de 92 à 123 mois, 4 enfants provenant du

groupe *Sem*, 6 provenant du groupe *Mod* et 3 du groupe *Stand*. Si l'âge ou l'expérience sont suffisants pour expliquer les taux d'amélioration, alors les performances du groupe jeune à la session 2 ne devraient pas être très différentes de celles du groupe âgés à la session 1.

Avant de faire cette comparaison, une première analyse fût effectuée afin de vérifier si à la session 1, les performances des enfants les plus âgés sont meilleures ou analogues à celles des enfants les plus jeunes à la même session. Si les enfants âgés sont plus sévèrement affectés que les plus jeunes, alors la supériorité de performance du groupe jeune à la session 2 sur le groupe des âgés sera sans signification. Le nombre de réponses correctes aux tâches a été analysé par des MANOVA (2 Groupes d'âge X 2 Sessions X n Tâches, avec la session et la tâche comme mesures répétées). Le facteur Groupe d'âge était significatif dans la tâche de répétition immédiate et dans les 3 tâches métaphonologiques ; les enfants plus âgés présentaient de meilleures performances que les enfants jeunes (Répétition immédiate : $F(1,23) = 4.43, p < .05$; Tâches métaphonologiques : $F(1,23) = 7.677, p < .02$). Le facteur âge n'est significatif, ni dans la tâche de mixage des sons, ni dans les tâches de lecture en fonction de la fréquence ou de la régularité. Fait plus important, les interactions Age X Session, Age X Tâche et Age X Session X Tâche ne sont pas significatives et ce, dans aucune des tâches. Cette absence de significativité des interactions avec l'âge montre que les enfants les plus âgés et les plus jeunes s'améliorent de la même façon, avec des performances plus élevées pour les enfants âgés tant à la session 1 que à la session 2 (en répétition immédiate et à 3 tâches métaphonologiques) ou sans aucune différence de performances entre les deux groupes d'âges (pour la tâche de mixage de sons et les 5 tâches de lecture). Il peut donc être conclu que, dans notre échantillon, les enfants les plus vieux ne sont pas plus affectés que les enfants les plus jeunes. Donc, les scores obtenus par les enfants plus âgés à la session 1 peuvent être pris comme score contrôle afin de vérifier si les améliorations de performances des enfants les plus jeunes peuvent être dues à l'âge seulement. Si les scores des enfants jeunes à la session 2 ne sont pas significativement plus élevés que les scores des enfants les plus vieux à la session 1, alors l'amélioration observée chez ces enfants jeunes ne peut être attribuée à la rééducation en elle-même mais plutôt au vieillissement, c'est à dire à la maturation spontanée et à l'expérience. Alternativement, si les scores des enfants les plus jeunes à la session 2 sont plus élevés que les scores des enfants les plus vieux à la session 1, cette supériorité peut être attribuée à l'entraînement ou à l'effet de test-retest.

*M = Moyenne, DS =
Déviation standard*

Dans les tâches de lecture selon la fréquence des mots, les enfants les plus jeunes obtiennent de meilleurs résultats à la session 2 ($M = 20.846, DS = 4.279$) que les enfants les plus âgés à la session 1 ($M = 16.667, DS = 3.962$) (facteur âge : $F(1,23) = 6.896, p < .05$). Comme on pouvait s'y attendre d'après les données rapportées ci-dessus, le facteur tâche est significatif ($F(1,23) = 56.103, p < .00001$). L'interaction Age X Tâche n'est pas significative ($F(2,46) = 0.224$). Une analyse post hoc (HSD Tukey) montre que le score de tous les enfants en lecture de mots fréquents est significativement plus élevé que le score en lecture de mots rares, et que ce dernier est plus élevé que le score en lecture de non-mots (HSD Tukey, $p < .001$).

Dans les tâches de lecture selon la régularité, les enfants les plus jeunes ont de meilleurs résultats à la session 2 ($M = 19.154, DS = 4.705$) que les

enfants âgés à la session 1 ($M = 15.333, DS = 2.387$) ($F(1,23) = 8.39, p < .01$). Le facteur tâche est significatif ($F(1,23) = 90.752, p < .00001$) montrant des scores plus élevés en lecture de mots réguliers que en lecture de mots irréguliers. L'interaction Groupe X Tâche n'est pas significative ($F(1,23) = 1.764, p > .10$).

Dans les tâches métaphonologiques, également, les plus jeunes ont des meilleurs résultats à la session 2 ($M = 7.564, DS = 2.28$) que les enfants âgés à la session 1 ($M = 3.361, DS = 3.2$) ($F(1,23) = 53.602, p < .00001$). Le facteur tâche est significatif ($F(2,46) = 10.438, p < .0005$), tout comme l'interaction Age X Tâche ($F(2,46) = 5.387, p < .01$). L'analyse de cette interaction montre que les enfants jeunes à la session 2 ont de meilleurs résultats que les enfants âgés à la session 1 et ce, dans les trois tâches suivantes : Inversion de syllabes et de phonèmes et suppression de consonne ($F(1,23) = 5.628, p < .05$; $F(1,23) = 23.676, p < .0001$; $F(1,23) = 32.327, p < .0001$, respectivement). Alors que les performances du groupe jeune en post-test ne diffèrent pas significativement entre les tâches (Inversion de syllabes : $M = 8, DS = 1.527$; Inversion de phonèmes : $M = 7.538, DS = 1.45$; Suppression de consonne : $M = 7.154, DS = 3.411$), dans le groupe d'enfants âgés, les performances en pré-test étaient meilleures en inversion de syllabes ($M = 6, DS = 2.594$) qu'en inversion de phonèmes ($M = 3.25, DS = 2.8$) et meilleures qu'en suppression de consonne ($M = 0.83, DS = 1.85$) ($F(1,23) = 9.34, p < .01$; $F(1,23) = 6.106, p < .015$, respectivement).

En ce qui concerne la tâche de mixage de sons, la différence entre le groupe jeune à la session 2 et le groupe âgé à la session 1 n'est pas significative (Groupe jeune : $M = 7.923, DS = 5.283$; Groupe âgé : $M = .833, DS = .04$). Les deux groupes ne diffèrent pas non plus en ce qui concerne la répétition immédiate de non-mots (Groupe jeune : $M = 13.038, DS = 4.845$; Groupe âgé : $M = 12.895, DS = 4.883$). L'interaction Groupe X Tâche n'est pas significative.

En résumé, les enfants plus jeunes ont des performances plus élevées après rééducation (session 2) que les enfants les plus vieux avant rééducation (session 1) en ce qui concerne les 5 tâches de lecture et les 3 tâches métaphonologiques. Donc, l'amélioration observée de la session 1 à la session 2 semble être due à la rééducation plutôt qu'à l'âge et /ou l'expérience, du moins, en ce qui concerne les tâches sus-nommées.

Les tâches pour lesquelles l'amélioration ne peut pas être attribuée avec certitude à la rééducation sont la répétition immédiate de non-mots et le mixage de sons. Dans les tâches de répétition immédiate, un effet plafond n'est pas plausible du fait que le nombre de réponses correctes du groupe d'enfants jeunes n'a pas atteint le maximum à la session 2. L'amélioration dans la répétition immédiate de non-mots et dans la tâche de mixage de sons semble être moins sensible à la rééducation et pourrait être liée à la maturation spontanée et à l'expérience propre des enfants.

Néanmoins, le fait de retester ces enfants avec les mêmes tâches pourrait être un facteur contribuant à l'amélioration de performances. C'est pourquoi un groupe contrôle spécifique a été étudié pour examiner l'effet de test-retest.

4.1.7 Étude de l'effet test-retest

Afin d'examiner l'effet de test-retest de la Batterie BELEC, un groupe de 9 enfants souffrant d'une dyslexie avec un déficit phonologique mais n'étant pas encore inclus dans aucune rééducation spécifique (excepté le fait qu'ils soient scolarisés dans une structure spécifique) a été testé et retesté après un mois de délai. Les enfants de ce groupe contrôle ont été appariés en âge et en niveau scolaire aux enfants ayant suivi la rééducation *Mod*, car c'est le groupe qui a le délai le plus court entre le test et le retest (l'effet du test-retest pour un délai plus long est pris en considération par la standardisation de la batterie BELEC elle-même puisque l'échantillon de cette batterie était testé à deux reprises à un an d'écart). Les ANOVAs effectuées sur le nombre de réponses correctes de ce groupe contrôle et du groupe *Mod* furent construites sur ce modèle : 2 Groupes X 2 Session X n Tâches avec la Session et la Tâche comme mesures répétées.

En ce qui concerne les trois tâches de lecture de mots selon leur fréquence, les deux tâches de lecture selon leur régularité, les deux tâches de répétition immédiate de non-mots et les trois tâches métaphonologiques, l'interaction Groupe X Session est significative montrant une amélioration significative de la session 1 à la session 2 pour le groupe rééduqué mais aucune amélioration pour le groupe non rééduqué. Aucune des interactions Groupe X Session X Tâche n'était significative (Groupe X Session : Lecture selon la fréquence, $F(1,16) = 20.531$, $p < .0005$; CV-CCV, $F(1,16) = 32.667$, $p < .00001$; Métaphonologie, $F(1,16) = 6.954$, $p < .02$) (Comparaison planifiées, Facteur Session : Lecture en fréquence dans le groupe contrôle ($F(1,16) = 1.14$, $p > .10$, dans le groupe *Mod* $F(1,16) = 55.889$, $p < .00001$; Lecture en régularité dans le groupe *Mod* $F(1,16) = 40.127$, $p < .00001$; CV-CCV dans le groupe contrôle $F(1,16) = 0$, $p > .10$, dans le groupe *Mod* $F(1,16) = 65.33$, $p < .00001$; Tâches métaphonologiques dans le groupe contrôle $F(1,16) = 2.987$, $p > .10$, dans le groupe entraîné $F(1,16) = 29.782$, $p < .0001$).

Dans les deux tâches de lecture selon la régularité des mots, l'interaction Groupe X Session est également significative ($F(1,16) = 5.902$, $p < .05$). L'amélioration est significative dans les deux groupes, toutefois plus importante dans le groupe rééduqué ($F(1,16) = 40.127$, $p < .00001$, amélioration moyenne = 26%), que dans le groupe contrôle ($F(1,16) = 8.403$, $p < .05$, amélioration moyenne = 12%).

Dans la tâche de mixage de sons, le facteur Session est significatif, mais non l'interaction Groupe X Session. Un test de Bonferroni en post-hoc montre l'amélioration n'est significative que dans le groupe *Mod* ($p = .00006$) et non dans le groupe contrôle; l'amélioration est en moyenne de 34% dans le groupe contrôle, et de 145% dans le groupe *Mod*. Aucune des interactions Groupe X Session X Tâche n'est significative.

On peut conclure ici que le fait de retester avec les mêmes stimuli ne peut expliquer en soi le taux d'amélioration des groupes d'enfants rééduqués à la session 2 et ce, dans aucune des tâches, même si une très faible amélioration a été détectée dans la tâche de lecture selon la régularité des mots dans le groupe contrôle.

Tous ces résultats pris ensemble, suggèrent fortement que la supériorité des enfants jeunes à la session 2 comparés aux enfants vieux de la session 1 dans les 3 tâches métaphonologiques et les 5 tâches de lecture,

résulte plus probablement de la rééducation que de la maturation ou de l'effet de test-retest.

4.2 RÉSULTATS EN IMAGERIE CÉRÉBRALE

4.2.1 *Analyse en Voxel-based*

Afin de répondre à la question de la spécificité de chaque rééducation sur les activations cérébrales, nous avons tout d'abord comparé, pour chaque tâche la différence d'activations entre les groupes de sujets rééduqués, deux à deux. Des tests *t* ne révélèrent aucune différence significative entre les groupes. De plus, au sein de chaque groupe et ce pour chaque tâche, des tests *t* ne révélèrent aucune différence significative entre avant et après rééducation.

Afin de savoir si les trois rééducations ont un effet commun sur les activités cérébrales, on a procédé de la manière suivante. Nous avons effectué un one sample *t*-test pour chaque tâche et pour l'ensemble des sujets, sans distinction de rééducations, comme s'ils ne formaient qu'un seul groupe. Seules les activations ayant un *Z*-score supérieur à 2.9 furent prises en compte. Les tables 14 et 15 reportent les clusters pour chacune des tâches avant et après rééducation. Ces résultats sont présentés en figure 4.

Analysons plus en détail les activations observées :

- Pour la tâche de lecture de mots fréquents et réguliers, avant rééducation, on observe des activations bilatérales dans le gyrus cingulaire antérieur et l'insula, ainsi que des activations à droite dans le gyrus frontal moyen, et à gauche dans l'aire de Broca. Après rééducation, des activations bilatérales sont présentes dans le gyrus frontal supérieur et moyen, à gauche dans le gyrus temporal supérieur et à droite dans le gyrus cingulaire.
- Pour la tâche de lecture de mots rares ou irréguliers, des activations significatives sont observées avant mais pas après rééducation. Elles se situent de manière bilatérale dans le gyrus frontal supérieur et moyen, à droite dans la partie antérieure du gyrus préfrontal et à gauche dans le cortex cingulaire antérieur.
- Pour la lecture de pseudomots, deux clusters d'activations sont présentes avant rééducation, dans le gyrus précentral gauche et dans le gyrus frontal supérieur droit. Après rééducation, seul le cluster présent dans le gyrus précentral gauche est présent.
- Pour la tâche de discrimination auditive de syllabes, on trouve de très nombreuses activations. Avant rééducation, des activations bilatérales sont observées dans le gyrus temporal supérieur (auditif et aire de Wernicke), à droite dans le gyrus temporal moyen, le cortex cingulaire et dans le lobe pariétal inférieur. Enfin dans l'hémisphère droit, des activations sont observées dans le gyrus frontal supérieur et inférieur. Après rééducation, les activations se situent de manière bilatérale dans les aires de Wernicke (plus étendues à gauche qu'à droite), et dans le cortex frontal inférieur.
- Finalement, dans la tâche de détection de rimes avant rééducation, les activations significatives sont, en bilatéral, dans le gyrus angulaire, le lobe frontal inférieur, le gyrus frontal supérieur et le cortex cingulaire antérieur. D'autres activations se situent dans le gyrus fusiforme droit, le cortex cingulaire postérieur gauche et dans les gyri précentral et frontal inférieur gauche. Après rééducation, des

	Avant			Après		
	BA	Coord	Z-score	BA	Coord	Z-score
Reg	24 G	-4,6,24	3.7885	6 D	60,-4,34	3.6632
	32 D	6,14,34	3.0995	22 G	-54,8,4	3.5404
	32 G	-6,10,34	3.0638	6 G	-58,-2,28	3.4425
	13 G	-40,10,4	3.7429	22 G	-50,12,-2	3.4372
	45 G	-36,24,6	3.1647	32 G	-8,14,34	3.1284
	6 D	50,-10,36	3.5694			
	13 D	36,16,4	3.4962			
	13 D	48,10,2	3.4307			
	10 D	42,44,20	3.0604			
	10 D	30,62,10	3.001			
Irreg	6 D	50,-10,36	3.0246			
	6 G	-42,-12,34	2.9678			
	6 G	-60,0,24	2.9312			
	10 D	30,62,14	2.9273			
	24 G	0,-8,26	2.9072			
	10 D	36,50,2	2.8952			
Pseudo	6 G	-58,-4,28	2.5341	6 G	-62,0,26	2.543
	10 D	26,62,2	2.5097			

TAB. 14: Quantification des clusters trouvés pour les trois tâches de lecture effectuées en IRMf, toutes rééducations confondues. Aucun cluster significatif n'apparaît pour la tâche de lecture de mots irréguliers, après rééducation. G = Hémisphère Gauche, D = Hémisphère droit

	Avant			Après		
	BA	Coord	Z-score	BA	Coord	Z-score
Sons	22 D	62,-30,4	6.0237	22 D	62,-6,4	5.0814
	41 D	54,-22,6	5.6067	41 D	60,-22,6	4.8945
	21 D	62,-4,-4	5.1009	22 D	48,-22,4	4.7719
	42 G	-60,-30,12	5.2826	22 G	-58,0,-6	4.9402
	41 G	-40,-34,18	5.2729	22 G	-62,-26,6	4.6899
	41 G	-44,-24,10	5.106	22 G	-62,-14,6	4.4885
	24 D	2,-10,32	4.0091	47 G	-38,26,0	3.2762
	40 D	46,-46,38	3.3547			
	10 G	-32,56,6	3.2457			
	10 G	-30,42,20	3.2131			
Rimes	19 D	32,-80,32	4.6897	10 G	-36,50,4	3.2831
	39 D	30,-64,34	4.2076	6 G	-40,2,28	3.0233
	40 D	42,-46,38	3.9691	45 G	-54,16,0	2.8046
	10 G	-40,40,-2	4.3587	10 D	36,50,2	3.2369
	46 G	-48,38,12	4.282	46 D	44,44,4	3.2141
	47 G	-34,24,-2	4.1737	10 D	30,58,2	2.9451
	31 G	-26,-70,28	4.2425			
	39 G	-26,-58,34	3.961			
	40 G	-42,-42,36	3.3712			
	9 D	50,12,34	4.231			
	10 D	36,54,8	4.2005			
	9 D	42,4,36	4.0896			
	23 D	2,-26,26	3.5089			
	32 D	12,10,34	3.4917			
	32 D	2,32,26	3.3779			
	32 G	-10,12,34	3.3404			
	4 G	-62,-2,22	3.3953			
	24 D	6,4,28	3.2828			

TAB. 15: Quantification des clusters trouvés pour les tâches de discrimination de sons et détection de rimes effectuées en IRMf, toutes rééducations confondues. G = Hémisphère Gauche, D = Hémisphère droit

activations bilatérales furent trouvées dans le gyrus frontal supérieur et moyen, dans le gyrus frontal inférieur droit, dans l'aire de Broca gauche, et dans les gyri frontal inférieur et moyen gauche.

Toutefois, les différences trouvées ici entre les deux sessions pour chaque tâche ne sont que des tendances. En effet, une analyse par un test de t comparant deux échantillons ne révèle aucune différence significative entre les deux sessions et ce, pour aucune des tâches, de la même manière qu'aucune différence n'avait été trouvée au sein de chaque groupe de rééducation.

L'absence de différence entre avant rééducation et après rééducation au sein de chaque groupe pourrait éventuellement s'expliquer par le nombre relativement faible de sujets au sein de chaque groupe qui se traduit par une possible faiblesse de la puissance statistique. Toutefois, cette explication ne tient plus lorsque l'on fait l'analyse sur l'ensemble des sujets. On peut alors invoquer les différences inter-individuelles très importantes entre les sujets au niveau de leurs activations cérébrales, ces différences pouvant interférer dans une analyse paramétrique par t-test.

Un bon moyen pour éviter cet écueil est d'effectuer une Analyse en Composantes Indépendantes (ACI). De plus, ce type d'analyse va nous permettre de mettre en évidence la connectivité entre les aires cérébrales pendant les tâches effectuées en IRMf [328]. Enfin, cette analyse va nous permettre de tester notre hypothèse d'un effet commun des trois méthodes de rééducation.

4.2.2 Analyse en composantes indépendantes des activations cérébrales

La Gift Toolbox [329] fût utilisée pour réaliser chacune des ACI effectuées ci-dessous.

Pour chaque session IRMf et pour chaque sujet, le nombre optimal de composantes est d'abord calculé, puis, avec ce nombre, le signal global est décomposé grâce à l'algorithme Infomax¹, décrit par Bell et Sejnowski [18]. Ensuite, afin de sélectionner les composantes les plus pertinentes, une régression multiple fut faite entre toutes les composantes trouvées et les régresseurs de la matrice SPM5 utilisée pour l'analyse (cette matrice provient du premier niveau d'analyse statistique de SPM5, grâce à l'utilisation de la fonction de réponse hémodynamique comme modèle). En d'autres mots, nous cherchons les composantes qui sont les plus corrélées, de manière positive, avec le signal BOLD, donc les composantes qui sont les plus corrélées avec la tâche effectuée.

Seules les corrélations avec un coefficient $R^2 > 0.2$ furent prises en compte. Enfin, afin d'avoir une moyenne pour l'ensemble des sujets, un one-sample t-test fut effectué sur ces composantes dans SPM5. Comme pour les analyses précédentes, seules les activations ayant un Z-score > 2.9 furent prises en compte.

La liste détaillée des activations trouvées figure dans les tables 16, 17 et 18. Les composantes sont représentées dans la figure 5.

Globalement, on peut observer une réduction d'activité entre la session 1 et la session 2, excepté dans la tâche de détection de rimes.

Examinons les zones cérébrales impliquées :

Les composantes sont présentées ici dans leur ordre de corrélation, de la plus corrélée à la moins corrélée

¹ Infomax est le nom d'un algorithme de décomposition d'un signal en composantes indépendantes. Cet algorithme est optimisé pour les principes des réseaux neuronaux.

SESSION	COMP.	BA	COORD.	Z-SCORE		
Mots réguliers	1	10 D	36,56,6	5.8872		
		10 D	26,66,-6	5.4028		
		10 G	-38,52,8	4.4513		
		10 G	-40,54,-2	4.3012		
		30 G	-28,-54,10	3.7134		
		19 G	-26,-88,26	3.686		
		13 D	42,20,8	3.1204		
	2	22 D	48,-40,8	4.4948		
		22 G	-46,-34,4	4.2829		
		21 D	56,-12,-8	4.2335		
		39 G	-60,-58,10	3.7511		
		40 G	-50,-50,22	3.5588		
		9 G	-8,44,26	3.5134		
		9 D	4,46,26	3.3878		
		47 right	54,20,-4	3.4418		
		Mots irréguliers	1	37 G	-52,-66,6	5.2726
				2 G	-64,-26,36	5.2573
40 G	-48,-30,38			4.6705		
24 D	4,0,40			4.8376		
24 G	-6,2,40			4.4157		
40 D	62,-32,38			4.8313		
2 D	52,-28,40			4.7148		
3 D	60,-16,28			4.3585		
39 D	48,-74,20			4.6974		
19 D	44,-80,26			3.6635		
2	31 D		20,-60,26	4.4696		
	31 G		-14,-26,38	4.4136		
	13 D		38,0,12	4.1298		
	22 D		58,8,-4	4.0075		
	44 D		62,10,4	3.3804		
	39 G		-42,-72,24	3.9534		
	9 G		-54,6,30	3.827		
2	10 D	28,66,-4	7.0017			
	10 D	28,68,8	6.4278			
	22 G	-42,-28,2	3.5741			
	40 D	60,-54,38	3.6886			
	40 D	52,-52,38	3.3663			

TAB. 16: Liste des activations trouvées avant rééducation en analyse par composantes indépendantes pour les tâches de lecture de mots réguliers et irréguliers. Comp. désigne le numéro de la composante par ordre de corrélation avec le signal BOLD.

SESSION	COMP.	BA	COORD.	Z-SCORE
Pseudomots	1	10 D	44,50,-2	5.9214
		10 D	24,68,-6	5.8565
		40 G	-66,-52,32	4.1927
		39 G	-60,-66,28	3.9844
		40 D	54,-58,38	3.9937
	2	10 G	-38,56,-2	3.6123
		11 G	-42,46,-8	5.7724
		10 G	-36,52,14	5.492
		45 G	-52,16,4	4.5502
		10 D	32,64,-2	4.2513
		19 D	46,-82,20	3.6494

TAB. 17: Liste des activations trouvées avant rééducation en analyse par composantes indépendantes pour la tâche de lecture de pseudo-mots. Comp. désigne le numéro de la composante par ordre de corrélation avec le signal BOLD.

- Lecture de mots fréquents et réguliers. Avant rééducation, la première composante est localisée de manière bilatérale, dans le gyrus frontal supérieur et moyen, dans le gyrus parahippocampique gauche, le cunéus gauche et l'insula droite. Cette première composante semble être moins diffuse après rééducation, et est seulement concentrée en BA 10, bilatéralement. La deuxième composante suit le même effet. Avant rééducation, elle est localisée de manière bilatérale dans le gyrus temporal moyen et supérieur, le gyrus frontal médian, le gyrus supramarginal gauche, et le gyrus frontal inférieur droit. Après rééducation, cette seconde composante est localisée dans le gyrus frontal moyen bilatéral, le gyrus frontal inférieur gauche, le gyrus angulaire droit, ainsi que dans le lobe pariétal supérieur et inférieur droit, le précunéus gauche, l'insula droite et le gyrus frontal supérieur droit.
- Lecture de mots irréguliers. Avant rééducation, le pattern observé est quasiment l'inverse de celui observé en lecture de mots réguliers. La première composante est étendue et localisée dans le gyrus temporal moyen bilatéral, le gyrus postcentral bilatéral, le lobe pariétal inférieur bilatéral, le gyrus cingulaire bilatéral, le précunéus droit, l'insula droite, le gyrus temporal supérieur droit et le gyrus frontal inférieur gauche. La deuxième composante est localisée dans le gyrus temporal supérieur bilatéral, le gyrus frontal moyen bilatéral, l'insula gauche, le gyrus supramarginal droit, et le lobe inférieur temporal droit. Comme pour la lecture de mots réguliers, les composantes après rééducation sont plus concentrées. La première composante est localisée dans le gyrus frontal moyen bilatéral et dans le gyrus frontal supérieur droit. La deuxième composante est localisée dans le gyrus frontal moyen bilatéral, le gyrus cingulaire droit et le gyrus frontal inférieur gauche (Aire de Broca).
- Lecture de pseudomots. Deux composantes coexistent avant rééducation. La première est localisée dans le gyrus frontal moyen

SESSION	COMP.	BA	COORD.	Z-SCORE
		41 G	-50,-22,8	6.0468
		42 G	-62,-14,8	5.9603
		22 G	-56,-6,0	5.7932
	1	13 D	44,-26,16	5.9248
		22 D	54,-16,2	5.8754
		45 G	-38,26,4	4.1041
		23 D	2,-28,28	4.072
		10 G	-4,46,12	5.0442
		23 D	6,-22,30	4.9447
		10 G	-28,46,20	4.4387
		9 G	-28,34,24	4.4187
		10 D	24,56,22	4.4318
		9 D	36,36,28	3.6521
		18 G	-30,-90,4	4.0619
		19 G	-30,-80,8	3.8967
Sons	2	17 D	10,-82,4	4.0564
		18 G	-2,-84,-2	3.2139
		17 G	-10,-82,6	3.9418
		6 G	-24,-10,38	3.8735
		4 G	-30,-16,40	3.802
		47 D	42,16,-8	3.787
		13 D	34,12,-8	3.2393
		40 G	-40,-48,36	3.7485
		40 D	52,-54,38	3.7401
		13 D	38,6,6	5.4762
		47 D	58,16,-4	5.3921
		13 G	-40,10,0	5.1579
	3	47 G	-36,18,-4	5.1007
		38 G	-52,14,-6	4.9994
		32 D	4,36,-4	3.7537
		24 G	-2,28,-6	3.307
		10 D	30,50,2	6.6034
		10 D	34,60,0	6.5376
Rimes	1	10 D	38,54,4	6.5193
		10 G	-34,56,2	5.641
		11 G	-34,52,-12	4.7282
		41 G	-34,-34,16	4.3413

TAB. 18: Liste des activations trouvées avant rééducation en analyse par composantes indépendantes pour la tâche de discrimination sonore et de détection de rimes. Comp. désigne le numéro de la composante par ordre de corrélation avec le signal BOLD.

bilatéral, le gyrus supramarginal gauche, lobe pariétal inférieur droit. La deuxième composante est localisée dans le gyrus frontal moyen bilatéral, le gyrus frontal supérieur bilatéral et le gyrus frontal inférieur gauche (aire de Broca). Après rééducation, une seule composante subsiste, qui est comparable à la première composante observée avant rééducation. En effet, elle est localisée dans le gyrus frontal moyen bilatéral, le gyrus frontal supérieur bilatéral, et dans le cortex cingulaire gauche.

- Comparaison auditive de syllabes différant par la consonne d'attaque. L'analyse en composantes indépendantes pour cette tâche particulière révèle un nombre plus important de composantes, qui font partie d'un réseau plus distribué d'aires cérébrales que dans les tâches de lecture. Avant rééducation, on peut observer 3 composantes. La première est localisée dans le gyrus temporal supérieur bilatéral, l'insula droite, le gyrus frontal inférieur gauche et dans le cortex cingulaire droit. La deuxième est située dans le gyrus frontal médian gauche, le cortex cingulaire droit, le gyrus frontal supérieur bilatéral, le gyrus occipital moyen gauche, le cunéus bilatéral, le gyrus lingual gauche, le gyrus frontal inférieur gauche et le lobe pariétal inférieur droit. La troisième composante est localisée dans l'insula bilatérale, le gyrus frontal inférieur droit, le gyrus temporal supérieur gauche, et dans le cingulaire antérieur bilatéral.

Après rééducation, le pattern de composantes est plus complexe. On dénombre une composante de plus, soit 4 en tout. La première est localisée dans le gyrus temporal supérieur bilatéral, le gyrus frontal inférieur gauche, le gyrus précentral gauche et le gyrus frontal moyen bilatéral. La deuxième composante se situe dans le gyrus frontal inférieur bilatéral et dans le gyrus temporal supérieur bilatéral. La troisième est localisée dans le gyrus frontal moyen gauche, le gyrus précentral gauche, le gyrus frontal inférieur gauche, le précuneus gauche et le cortex cingulaire gauche. La quatrième et dernière composante est localisée dans le précuneus droit, le cingulaire postérieur gauche, le gyrus temporal supérieur bilatéral, le gyrus occipital supérieur gauche, le gyrus frontal inférieur bilatéral et l'insula gauche.

- Détection de rimes. Contrairement à ce qui a été observé dans les tâches de lecture, les rééducations ont l'air d'accroître le nombre de composantes ainsi que l'étendue des activations. Avant rééducation, seule une composante significative est observée et localisée dans le gyrus frontal moyen bilatéral et le gyrus frontal supérieur gauche. Après rééducation, 4 composantes localisées dans des aires critiques pour le décodage du langage sont observées. La première est comparable à celle observée avant rééducation. Elle est localisée dans le gyrus frontal moyen bilatéral et dans le gyrus frontal supérieur gauche. La deuxième composante est localisée dans le gyrus frontal moyen droit, le gyrus frontal inférieur bilatéral, le lobe pariétal inférieur bilatéral, le précuneus bilatéral et le cortex cingulaire droit. La troisième est localisée seulement dans le gyrus frontal médian droit. La dernière composante est localisée dans le cingulaire antérieur bilatéral, le gyrus frontal moyen gauche, le précuneus gauche, l'insula gauche, le gyrus temporal supérieur gauche, et le gyrus temporal transverse gauche.

Ainsi, il est probable que les rééducations aient induit un changement d'activité cérébrale dans les tâches de traitement du langage.

4.2.3 *Corrélations entre les activations cérébrales et les résultats comportementaux*

Afin d'explorer dans quelle mesure les changements d'activation cérébrale après rééducation sont liés aux changements de performance dans les tests comportementaux, nous avons procédé de la manière suivante. Des régressions simples ont été calculées entre chaque contraste *IRMf* mesuré avant et après rééducation et les scores calibrés individuels (pour la session 1) ainsi que les scores calibrés évolutifs (pour la session 2) obtenus dans chaque tâche de la Batterie BELEC. Les scores calibrés avant rééducation et les scores calibrés évolutifs après rééducation sont en effet les mesures de performance qui représentent le mieux les scores des enfants dyslexiques par rapport aux scores contrôles. Ainsi, pour chaque session, 44 régressions furent calculées (2 séances d'*IRMf* X 11 tâches comportementales X 2 session comportementales). Afin de contrôler également l'âge des sujets pour les images cérébrales, l'âge en mois de chaque enfant a été pris en tant que covariable globale. Une correction de Bonferroni a été appliquée afin de déterminer un nouveau seuil de significativité ($p < 0.001$) :

– *Corrélations avec les images *IRMf* obtenues avant rééducation*

Au sein des images obtenues pour la tâche de lecture de mots réguliers dans le scanner, un cluster dans BA 10 (Coordonnées de Talairach : -30 ; 62 ; 12) est significativement corrélé avec les scores calibrés évolutifs obtenus après rééducation dans deux tâches métaphonologiques (Inversion de syllabes et inversion de phonèmes), ainsi que dans la tâche de lecture la plus difficile, la lecture de mots irréguliers.

Dans la tâche d'imagerie de détection de rimes, un cluster situé dans BA 44 gauche (-58 ; 12 ; 6) est significativement corrélé avec les scores calibrés évolutifs obtenus après rééducation dans 4 tâches métaphonologiques (inversion de syllabes et de phonèmes, deletion de consonne et mixage de sons) et dans 4 des 5 tâches de lecture (lecture de mots fréquents, mots rares, non-mots et mots irréguliers).

– *Corrélations avec les images *IRMf* obtenues après rééducation*

Dans les résultats d'imagerie obtenus pendant la tâche de lecture de mots réguliers, les activations des clusters situés en BA 10, 13, 21, 32, 38, 22 (hémisphère gauche) et dans BA 10, 13, 21, 32, 38, 24 (hémisphère droit) sont significativement corrélées avec le score calibré évolutif obtenu après rééducation dans la tâche métaphonologique d'inversion de phonèmes.

L'analyse des images obtenues pour la tâche de lecture de mots rares montre que des clusters se situant dans BA 10, 22 (hémisphère droit) sont corrélés avec les scores calibrés évolutifs obtenus après rééducation dans la tâche de répétition immédiate de non-mots. De plus, des activations se situant dans BA 13, 29, 42 (hémisphère gauche) sont corrélées avec les scores calibrés évolutifs obtenus après rééducation dans la tâche métaphonologique de deletion de phonèmes. Finalement, des activations se situant dans BA 22, 40 (hémisphère droit) sont corrélées avec les scores calibrés évolutifs obtenus après rééducation dans la tâche de lecture de mots réguliers.

L'analyse des images obtenues dans la tâche de lecture de pseudo-mots ne révèle aucune corrélation.

L'analyse des images obtenues dans la tâche de discrimination de syllabes montra que des activations se situant dans BA 21, 22, 42 (hémisphère droit) sont corrélées avec les score calibrés obtenus avant rééducation dans la tâche de répétition de non-mots. Les scores obtenus pour la même tâche mais cette fois-ci après rééducation furent trouvés comme étant corrélés avec des activations se situant dans BA 2, 3 (hémisphère droit).

L'analyse des des images obtenues pour la tâche de détection de rimes ne révèle aucune corrélation.

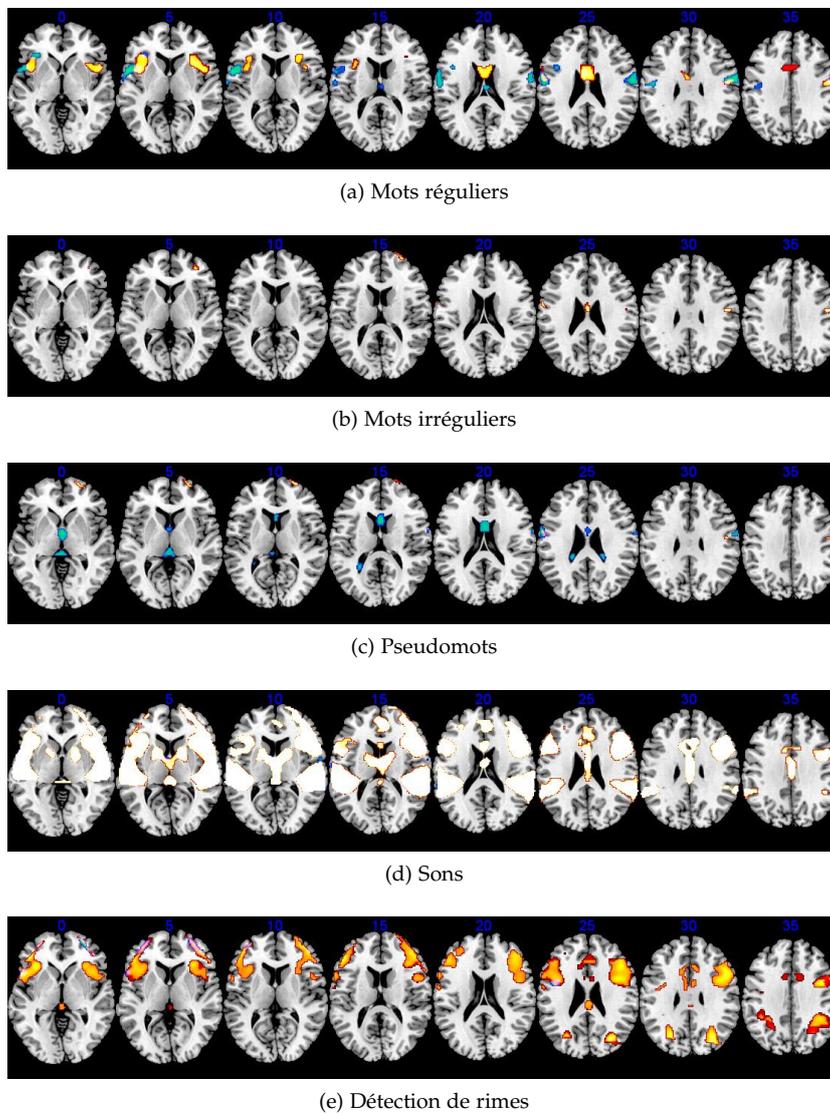


FIG. 4: Cartes fonctionnelles des 5 tâches en IRMf. Les activations avant rééducation sont en couleur chaude (rouge), les activations après rééducation sont en couleur froide (bleue). Les images sont en convention neurologique. La coordonnée Z de chaque image est respectivement, de gauche à droite : 0 / 5 / 10 / 15 / 20 / 25 / 30 (coordonnée de Talairach).

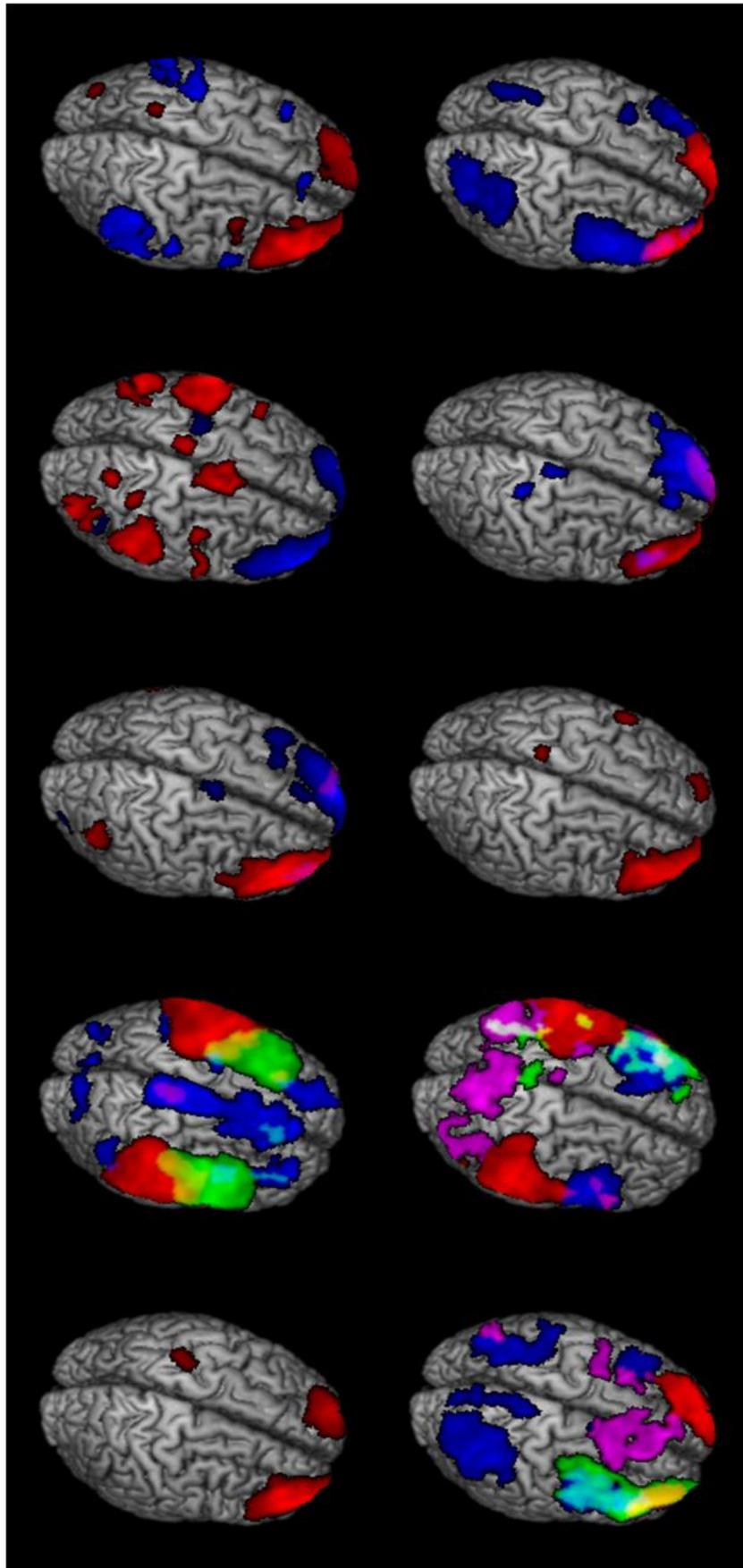


FIG. 5: Images des activations obtenues par l'analyse en composantes indépendantes. A gauche avant rééducation, à droite après rééducation. De haut en bas : lecture de mots réguliers, lecture de mots irréguliers, lecture de pseudomots, discrimination auditive de syllabes et détection de rimes. La composante la plus corrélée est en rouge, la deuxième en bleu, la troisième en vert et la quatrième en violet.

5.1 RÉSULTATS COMPORTEMENTAUX

Dans cette étude, premièrement, le critère d'inclusion assez restrictif a permis de réduire la variabilité inter-individuelle en ce qui concerne la nature de la dyslexie. Deuxièmement, la calibration des scores a permis de réduire les différences inter-individuelles en terme d'âge et de niveau scolaire, toutefois, l'attribution aléatoire des enfants dans les groupes de rééducation n'a pas pu permettre de concevoir des groupes parfaitement homogènes avec un faible nombre d'enfants par groupe. Ainsi, les conditions nécessaires à l'émergence de différences significatives entre les groupes de rééducation n'ont peut-être pas été optimales. Toutefois les différences inter-individuelles n'ont pas empêché l'émergence d'améliorations significatives entre les sessions et ce pour chaque groupe, ainsi que des différences significatives entre certaines des tâches. Ainsi, même si l'efficacité entre les programmes de rééducation a été en partie masquée par les différences inter-individuelles au sein de chaque groupe, les données présentes ici montrent que l'amélioration de chaque programme de rééducation est un phénomène robuste, plus robuste que les possibles différences entre eux. Il reste que l'efficacité d'un programme de rééducation dépend du degré et de la nature exacte du déficit. Une méthode peut être efficace avec un déficit modéré mais pas du tout avec un déficit sévère. Il n'est pas exclu que les différences inter-individuelles aient masqué les petites différences d'efficacité entre les rééducations. En gardant en mémoire ces différents avertissements, penchons-nous maintenant sur l'interprétation des résultats. L'analyse des scores calibrés révèle une amélioration des performances dans toutes les tâches (5 tâches de lecture, 2 tâches de répétition immédiate et 4 tâches métaphonologiques). Toutefois, le niveau d'amélioration ne rattrape pas le niveau des scores contrôles, comme le montre les scores calibrés évolutifs, excepté pour les habiletés en répétition de non-mot. Des différences de performance entre les groupes de rééducation furent observées pour certaines tâches. Ces différences, toutefois, ne résultaient pas d'une différence de sensibilité des programmes de rééducation sur les composantes de lecture et de parole. Les faibles scores calibrés observés dans le groupe de rééducation *Stand* pour la lecture de mots fréquents étaient présents avant l'application de la rééducation. Dans ce groupe, les enfants s'améliorèrent comme le firent les enfants des autres groupes, mais simplement en commençant à un niveau plus faible. De manière similaire, les scores calibrés obtenus aux tâches métaphonologiques (inversion de phonèmes et de syllabes, suppression de consonne) révélèrent un ordre différent de difficulté d'un groupe de rééducation à l'autre. Pourtant, ici aussi, les différences entre les programmes de rééducation ne résultaient pas de l'entraînement mais étaient bien présentes avant cet entraînement. Ces tâches métaphonologiques sont donc initialement de bons candidats pour la mise en relief des différences interindividuelles. Il est intéressant de noter que le taux d'amélioration pour les tâches métaphonologiques est similaire pour les trois programmes, malgré le fait que la rééducation *Stand* entraîne la

segmentation phonémique et syllabique de manière beaucoup moins importante que les deux autres types de rééducation, et malgré que la rééducation *Sem* entraîne seulement la segmentation syllabique très indirectement par rapport à la rééducation *Mod*. En conclusion, aucune différence entre l'efficacité des programmes n'a été observée, seulement des différences entre les groupes avant rééducation.

Nous avons montré que l'amélioration dans les trois tâches métaphonologiques et dans les 5 tâches de lecture, mais pas dans la répétition immédiate de non-mots et dans le mixage de sons, est liée aux rééducations plutôt qu'à la maturation naturelle ou au travail scolaire. La comparaison entre les performances des enfants les plus âgés en pré-test et les performances des enfants les plus jeunes en post-test a montré que les performances mesurées après rééducation sont meilleures que les performances d'enfants du même âge, sans rééducation. Le fait que les performances des enfants les plus jeunes en répétition immédiate et en mixage de sons n'étaient pas plus élevées en session 2 que celles des enfants les plus âgés en session 1 semble suggérer que ces deux tâches sont indépendantes des entraînements spécifiques et sont plus reliées à l'âge et à l'expérience. Ces deux tâches requièrent beaucoup plus de mémoire immédiate et de mémoire de travail que les 3 autres tâches métaphonologiques et les tâches de lecture. De plus, le fait que seules les performances en répétition de non-mots rattrapent celles du niveau contrôle supporte l'idée que les habiletés impliquées dans cette tâche diffèrent des habiletés impliquées dans les autres.

L'amélioration par rapport au premier test ne peut pas être expliquée par un effet de test-retest. La tâche de lecture selon la fréquence des mots, les tâches métaphonologiques et les tâches de répétition de non-mots ne présentaient pas d'amélioration au sein d'un groupe sans rééducation avec un test-retest d'une durée de 1 mois, comme il l'a été montré avec les analyses des résultats de performances dans la comparaison entre un groupe contrôle de dyslexiques non rééduqués et le groupe *Mod*.

En conclusion, la maturation spontanée et le travail scolaire sont moins efficaces que les rééducations en ce qui concerne la fréquence et la régularité, ainsi que pour les habiletés métaphonologiques (mais pas pour la répétition immédiate de non-mots et le mixage de sons). Les trois méthodes de rééducations empêchèrent les enfants de stagner et facilitèrent la normalisation de performances dans ces domaines.

Dans les études précédentes, l'amélioration dans la lecture de mots avec un programme de rééducation FFW n'est pas toujours observée [104, 89, 129, 320, 326, 4, 223]. La même chose fût observée en français [116]. Nos données montrent une amélioration pour les habiletés en lecture.

Dans une étude précédente sur des enfants francophones, Habib et al. [116] ont montré un effet spécifique sur la conscience phonologique, après une rééducation de type parole modifiée, comparativement à la même rééducation mais sans parole modifiée. Ici, on montre qu'une amélioration en conscience phonologique est observée avec un entraînement par parole modifiée, mais également avec un entraînement sur l'enveloppe sonore de la parole, et avec des exercices standards. L'amélioration en conscience phonologique ne requiert donc pas un entraînement spécifique en parole ralentie, du moins en Français. Ce résultat est concordant avec ceux d'autres études [59, 89] en langue anglaise, qui ont montré que l'entraînement en parole modifiée ne peut

pas être considéré à ce jour comme le programme d'entraînement le plus efficace pour améliorer la conscience phonologique. Il pourrait être argumenté que la durée de notre rééducation *Mod* était insuffisante pour souffrir la comparaison avec l'étude de Habib, où la durée par jour était plus courte de 20 minutes que dans la présente étude mais avait un total de 3 heures de plus (5 semaines au lieu de 4). Il devrait être toutefois noté que ces 3 heures de différence n'a pas empêché notre période de rééducation de générer des améliorations significatives en lecture de mots, amélioration qui n'était pas présente dans l'étude de Habib et al.

Les résultats présentés ici confirment également les résultats précédents indiquant une absence de différence d'amélioration entre les programmes de rééducation *Sem* et *Stand* [191]. Les effets similaires entre les rééducations *Mod* et *Sem* sont un résultat toutefois beaucoup plus surprenant, si l'on considère que la rééducation *Sem* entraîne uniquement le rythme syllabique d'une manière très indirecte.

Nos résultats montrent une absence de spécificité des programmes de rééducation. Il reste toutefois possible que chaque programme agit sur différents mécanismes spécifiques impliqués dans l'alphabétisation. Si c'est le cas, il serait intéressant de combiner les rééducations *Mod* et *Sem* en un seul programme. Il ne peut cependant pas être exclu que les 3 programmes agissent dans le même sens, c'est à dire qu'ils amènent l'attention des enfants à se focaliser sur les composantes de la parole et fournissent l'opportunité de travailler à leur rythme.

Le seul avantage des rééducations *Sem* et *Mod* sur la méthode *Stand* est la possibilité pour un orthophoniste d'entraîner 3 à 4 enfants en même temps, ce qui peut être un avantage d'un point de vue économique, mais aussi du point de vue de l'enfant. Un autre avantage est que les enfants peuvent être plus indépendants dans leur entraînement. Toutefois, ce point peut être un désavantage pour certains enfants. Finalement, l'intensive rééducation *Mod* fournit aux enfants la possibilité d'une période d'entraînement plus courte. Il serait peut être intéressant d'étendre le principe de l'entraînement intensif aux autres programmes que le *Mod*. Il reste que nous ne savons pas combien est stable l'amélioration observée pour chacun des trois groupes de rééducation.

5.2 RÉSULTATS EN IMAGERIE CÉRÉBRALE

L'étude en *IRMf* a été effectuée afin de savoir, en parallèle avec l'étude comportementale, si les rééducations ont un effet identifiable au niveau des activations cérébrales, et si les différences entre les rééducations peuvent également s'identifier au niveau de ces modifications d'activité cérébrale entre la session 1 (avant rééducation) et la session 2 (après rééducation).

Alors que l'analyse des performances montre une amélioration significative après rééducation pour chaque groupe, aucune changement systématique en terme d'activation cérébrale ne fût observé entre les différentes rééducations entre la session 1 et la session 2. Cette absence de différence détectable peut être attribuée au fait que les trois programmes de rééducation génèrent en fait les mêmes effets subtils sur un panel de différences inter-individuelles (présentes avant rééducation) à un moment où les participants font très probablement appel à des stratégies différentes afin d'effectuer les tâches requises pendant les

IRM. On doit souligner, toutefois, que le faible nombre de degrés de liberté relatif à chaque groupe de rééducation combiné aux grandes différences inter-individuelles participe probablement à cette absence de différence.

Considérant que les analyses des performances comportementales ne montrèrent aucune différence de performance entre les groupes après rééducation qui pourrait être attribuée aux particularités de chaque rééducation, il fut décidé de réaliser une analyse globale, afin de vérifier si la rééducation a un effet, quelque soit son mode opératoire, et afin de vérifier si les effets sur les activations cérébrales peuvent être liées aux performances comportementales. Il est clair que cette analyse globale agrandit la difficulté due à l'absence d'un groupe contrôle. Cependant, la comparaison entre activations pre- et post-rééducation et les corrélations avec les performances pre- et post-rééducation fournit suffisamment d'informations permettant d'interpréter les résultats.

Des changements communs d'activations cérébrales entre les sessions IRMf pre- et post-rééducation furent trouvés entre les trois groupes de rééducation. Des activations significatives à la session 1 diffèrent selon la tâche effectuée. Deux tendances principales émergent des ces résultats : premièrement, l'intensité des activations diminue après rééducation et deuxièmement, le ratio d'activations présentes dans l'hémisphère gauche par rapport à l'hémisphère droit augmente après rééducation. Ces deux résultats sont en accord avec les résultats de Aylward et al. [10], et de Temple et al. [319] Ces auteurs suggèrent que les enfants dyslexiques usent moins leur réseau de compensation après rééducation qu'avant. La décroissance du signal global après rééducation par rapport à avant peut être interprété comme montrant une difficulté décroissante à accomplir les tâches effectuées dans le scanner.

L'analyse en composantes indépendantes nous donne une idée plus précise du phénomène. Premièrement elle montre également une diminution d'activation entre la session 1 et la session 2 avec une concentration plus importante des composantes, excepté dans la tâche de détection de rimes.

Dans la tâche de lecture de mots réguliers, les deux composantes observées avant rééducation sont moins diffuses après rééducation. La première composante se concentre sur BA 10 dans les deux hémisphère après rééducation. La deuxième change de manière plus radicale. Après rééducation, elle semble faire une liaison fonctionnelle entre des régions situées de manière postérieure et dans les deux hémisphères du cortex (zones temporo-pariétales, lobe pariétal inférieur, gyrus angulaire et régions extrastriées) avec des régions frontales se recoupant partiellement avec la première composante. En d'autres termes, cette seconde composante semble faire le lien, et ce dans les deux hémisphères, entre les régions frontales (BA 10, 46) et les régions temporo-pariétales (BA 39, 40) après rééducation.

Ces régions temporo-pariétales sont connues pour être cruciales dans les processus phonologiques, spécialement chez les enfants [55]. La seconde composante peut être reliée aux résultats de Temple et al. [319] Ces auteurs décrivent un double phénomène de normalisation et de compensation dans l'activité cérébrale d'enfants dyslexiques après rééducation. Ce double phénomène semble être illustré également ici. La concentration d'activations frontales au sein de BA 10 pour la première composante, la situation temporo-pariétale de la deuxième avec le lien qu'elle effectue avec les régions frontales illustre le phénomène

de normalisation. Le fait que les changements se produisent dans les deux hémisphères illustre le phénomène de compensation, même si les activations dans l'hémisphère gauche croissent de manière relative à celles dans l'hémisphère droit. De plus, la seconde composante montre des activations dans BA 9, 10 et 46 dans l'hémisphère gauche. La co-activation de ces trois régions cérébrales a été reportée par Wang et al. [340] dans des tâches de lecture comportant des violations syntaxiques ou sémantiques comparativement à des tâches de lecture sans violation, chez des adultes normo-lecteurs. Hagoort [117] a également découvert l'importance de l'implication de BA 9 et BA 46 pour le contrôle de l'attention dans des tâches verbales, et Petrides et al. [220] rapportèrent l'implication de BA 46 dans les tâches verbales de mémoire de travail. Donc, il est possible que les résultats de l'analyse en composantes indépendantes des images obtenues pour la tâche de lecture de mots réguliers montre que les enfants dyslexiques, pourraient voir les mots communs comme s'ils n'était pas syntaxiquement correctes, ou tout du moins comme s'ils ne connaissaient pas leur syntaxe à priori. Des lors, afin de lire ces mots, un haut niveau d'attention et de mémoire de travail est requis, reflété par les activations que je viens d'évoquer. Les rééducations semblent avoir développé l'activation dans ces régions, donc dans des processus plus attentionnels, au détriment des régions cérébrales postérieures.

Dans la tâche de lecture de mots irréguliers, qui est supposée être une tâche de difficulté accrue, la première composante se situe principalement dans les deux hémisphères dans les régions somato-sensorielles et temporo-pariétales (avant rééducation). Ces régions somato-sensorielles furent trouvées par Richards et al. [240] comme étant des régions de compensation pour les enfants dyslexiques qui peuvent être significativement modifiées par deux types différents de rééducation, une phonologique et l'autre non-phonologique. Cette région a également été montrée comme participant aux processus phonologiques [200] [305]. En effet, comme le soulignent les auteurs, l'utilisation de la bouche ou bien des mains peut aider les enfants à mieux effectuer les activités de segmentation phonologique (par exemple pour compter le nombre de syllabes). Ceci peut être lié également aux récurrentes activations trouvées dans le cortex moteur BA 6 dans toutes les tâches effectuées en IRMf malgré que les enfants ne doivent pas bouger dans le scanner. De plus, le même raisonnement que celui effectué pour l'analyse de la lecture des mots réguliers peut être faite ici. Les rééducation semblent développer/privilegier les activations et connexions dans les régions frontales, les régions que j'ai qualifiées de régions compensatoires ou d'aide disparaissant.

Dans la tâche de lecture de pseudo mots, deux composantes coexistent avant rééducation. La première semble relier BA 10 dans les deux hémisphères à des régions temporo-pariétale (BA 39, 40). La seconde semble faire le lien entre les mêmes régions frontales (BA 10) avec l'aire de Broca gauche (BA 45) et les régions extrastriées (BA 19 et V5). Richards et al. [240] trouvèrent des différences dans ces régions extrastriées entre des enfants dyslexiques et des enfants contrôles également en lecture de pseudo-mots. Ils trouvèrent une activité plus importante dans V5 chez les dyslexiques avant rééducation. Ce résultat peut être crucial concernant le débat actuel sur le fait que la dyslexie serait basiquement causée par un déficit phonologique ou un déficit d'ordre visuel. Si l'on considère les deux composantes trouvées ici, alors les deux théories qui

au premier regard semblent compétitrices l'une de l'autre apparaissent comme expliquant ensemble les déficits phonologiques et orthographiques des dyslexiques.

Après rééducation, une seule composante subsiste, localisée dans les deux hémisphères, principalement dans BA 10 droit, dans le gyrus temporal gauche (BA 22) et dans le gyrus cingulaire postérieur (BA 31). Récemment, il a été montré que les enfants dyslexiques présentent un aspect anormal du traitement pré-attentif des informations tel que reflété par la composante électrophysiologique P50, obtenue dans une tâche de mémoire de travail verbale [214]. Stoitsis et collaborateurs [301] observèrent que la source de cette P50 se situait dans BA 31 pour les enfants dyslexiques et dans BA 30 pour les enfants contrôles. Dès lors, l'activation trouvée ici dans BA 31 pourrait refléter cette demande pré-attentive de la mémoire de travail dans la lecture de pseudo-mots, les rééducations ayant eu un effet sur ce processus attentionnel (On retrouve également ce phénomène pour la tâche de rimes, qui requiert beaucoup de mémoire de travail, voir plus bas).

Dans la tâche de discrimination sonore, l'analyse simple en voxel montra que les activations cérébrales après rééducation se concentrent essentiellement dans la région auditive de l'hémisphère droit BA 41 et BA 22. De plus, des activations dans BA 10 étaient présentes avant mais pas après rééducation. Ce dernier point suggère, tout en gardant à l'esprit que ce ne sont que des tendances, que la tâche requiert moins de processus cognitifs pour compléter la tâche après rééducation. L'analyse en composantes indépendantes montre que l'entraînement induit en fait un pattern d'activations et de connectivité plus complexe que ce qui a été montré par l'analyse en voxels. De la session 1 à la session 2, la première composante ne change pas et semble être le reflet des processus auditifs simples. La deuxième composante, avant rééducation pourrait être interprétée comme étant un processus visuo-attentionnel, mais sa fonction précise n'est pas claire, si l'on considère son étendue sur le cortex. La troisième composante, avant rééducation également, concerne essentiellement l'aire de Broca dans les deux hémisphères, ce qui pourrait faire le lien avec un éventuel processus de prononciation des syllabes, cette prononciation étant interne. Après rééducation, la localisation de ces deux dernières composantes devient moins hétérogène et est plus concentrée, pour la composante 2 dans Broca bilatéral, et pour la composante 3, dans Broca gauche uniquement, comme si l'hémisphère droit compensait simplement le déficit avant rééducation. Une quatrième composante peut être observée après rééducation, qui semble faire le lien entre les régions temporo-parietales avec les régions frontales inférieures.

Dans la dernière tâche, celle de la détection de rimes, contrairement aux autres tâches, le nombre de composantes augmente après rééducation. La plus grande difficulté de cette tâche pourrait expliquer cette particularité. Avant rééducation, seule une composante est suffisamment corrélée avec le signal BOLD. Elle est localisée en frontal bilatéral, ce qui semble coller avec la grande difficulté rencontrée par les enfants dyslexiques dans l'accomplissement de la tâche. Après rééducation, la présence de multiples composantes localisées dans des zones critiques pour le décodage du langage semble refléter l'amélioration des enfants dans leur capacité à lire. toutefois, la complexité d'un tel pattern de composantes requiert de plus amples analyses.

Corrélations entre les activations cérébrales et les résultats comportementaux

Soulignons tout d'abord le fait qu'aucune corrélation ne fût trouvée entre les performances comportementales avant rééducation et les activations cérébrales obtenues avant rééducation, dans aucune des tâches. Ce résultat pourrait être relié à la grande variabilité inter-individuelle comme suggéré plus haut. Toutefois, et ce sans trop de surprises, plusieurs activations mesurées après rééducation sont positivement corrélées avec les performances comportementales après rééducation. Ces régions sont, d'après la littérature, impliquées dans les tâches de lecture et/ou les tâches métaphonologiques chez les enfants dyslexiques.

Il peut être conclu que les trois différentes méthodes de rééducation améliorent simplement ces capacités et modifient aussi bien l'activité cérébrale. La corrélation entre les deux types de mesures (imagerie et comportemental) n'exclut pas l'interprétation selon laquelle les améliorations de performance ne seraient dûes qu'à une maturation cérébrale et/ou à l'expérience personnelle de l'enfant plus qu'à la méthode de rééducation. Mais il a été montré que ce n'était pas le cas (voir les résultats comportementaux en chapitre 4). De plus, dans l'analyse en corrélations, l'âge a été pris en compte comme covariable globale.

A notre connaissance, à cette date, aucune étude n'a montré de relation entre des activations cérébrales et des capacités comportementales au cours du temps. Ici, il a été montré que des activations obtenues avant rééducation peuvent « prédire » la quantité d'amélioration dans certaines compétences de langage après rééducation. C'était particulièrement le cas dans l'aire de Broca gauche (BA 44) pendant les détections de rimes pour la prédiction des scores calibrés évolutifs des 4 tâches métaphonologiques et dans 4 des 5 tâches de lecture. Les activations dans BA 10 pendant la tâche de lecture de mots fréquents/réguliers peuvent également prédire les performances dans les tâches comportementales d'inversion de phonèmes et de syllabes, ainsi que dans les tâches de lecture de mots irréguliers, après rééducation.

Inversement, les performances comportementales obtenues avant rééducation pour la tâche de répétition immédiate de non-mot de type CV peuvent prédire la quantité d'activation dans les régions auditives et de Wernicke (BA 21, 22, 42) de l'hémisphère droit, obtenues durant la tâche de discrimination auditive en IRMf après rééducation.

Tous ces résultats tendent à confirmer premièrement que, les trois programmes de rééducation ont des effets similaires sur l'amélioration de performance ainsi que sur l'activité cérébrale. Deuxièmement, si certains effets des rééducations peuvent être différents dans un sens, ils ne diffèrent cependant pas suffisamment pour être différenciés par les performances ou les activités cérébrales. Les résultats présentés ici en langue Française sont en accord avec la méta-analyse du « National reading panel » qui conclut que les différentes rééducations ont globalement les mêmes effets.

5.3 CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans ce projet de recherche, que ce soit en analyse comportementale ou au travers de l'étude en imagerie cérébrale, nous avons montré que les enfants souffrant de dyslexie développementale phonologique et rééduqués montrent une amélioration plus importante que celles prédites

par l'âge et la maturation cérébrale naturelle entre les deux sessions. Les trois différentes méthodes de rééducation résultèrent en la même amélioration dans beaucoup d'habiletés impliquées dans l'alphabétisation. Les activations cérébrales révélées par l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle furent similaires après les trois programmes de rééducations mais furent différentes suivant la tâche à effectuer. De plus, l'amélioration dans certaines habiletés du langage furent trouvées comme pouvant être prédites par les activations cérébrales dans certaines régions spécifiques.

Troisième partie

ETUDE 2 : LE DÉFICIT AUDITIF
PRÉ-ATTENTIF CHEZ L'ENFANT
DYSLEXIQUE, ÉTUDE DE LA MISMATCH
NEGATIVITY PROVOQUÉE PAR DES
VOYELLES EUROPÉENNES.

Au sein de cette partie, nous allons faire une revue de la problématique qui a amené à l'initiation de ce projet de recherche. Le projet NEURODYS, qui a débuté fin 2006, constitue un effort européen de grande ampleur pour clarifier les bases biologiques de la dyslexie développementale (trouble spécifique de la lecture et de l'écriture). La dyslexie est un trouble de l'apprentissage fréquent qui affecte une partie non négligeable des enfants scolarisés, et qui a une forte composante biologique. L'exploration des liens entre la dyslexie, les aires cérébrales sous-jacentes et les gènes de susceptibilité nécessite d'étudier de grandes populations à travers diverses langues et cultures, une condition réunie dans ce consortium financé par la Commission Européenne à hauteur de 3 millions d'euros.

NEURODYS réunit 15 groupes de recherche scientifique et clinique d'excellence, répartis sur 9 pays. Il couvre les langues de la majorité des 2,5 millions d'enfants dyslexiques européens. Ce projet combine des approches innovantes pour comprendre comment les influences génétiques et environnementales se conjuguent pour altérer le développement cérébral et l'acquisition de la lecture. Près de 4000 enfants de plusieurs pays ont participé à cette étude.

La partie française du projet Neurodys est conduite par des laboratoires du CNRS et de l'INSERM, en collaboration avec cinq centres référents pour les troubles du langage à Paris, Lyon, Marseille, Toulouse et Grenoble. En plus du financement européen, le projet est soutenu par la Ville de Paris et l'Agence nationale de la recherche.

L'unité INSERM 825 s'inscrit dans ce projet en participant à l'aspect étude électrophysiologique de la dyslexie, et plus précisément de son déficit pré-attentif supposé. Le groupe chargé d'étudier ce phénomène au sein de Neurodys comporte 4 laboratoires européens (nom de code : Working Package 7) :

- Département de psychologie, centre de l'excellence en apprentissage et en motivation, Université de Jyväskylä, Finlande. Équipe dirigée par le prof. Paavo Leppanen.
- Institut de psychologie HAS, groupe de recherche de la psychophysiology développementale, Budapest, Hongrie. Équipe dirigée par le prof. Valeria Csèpe.
- Département de psychiatrie, de psychosomatique et de psychothérapie de l'enfant et de l'adolescent, université de Munich, Allemagne. Équipe dirigée par le prof. Gerd Schulte-Körne.
- L'unité Inserm 825 de Toulouse, au sein de laquelle j'ai travaillé sur ce projet. Équipe dirigée par le Dr Jean-François Demonet.

6.1 INTRODUCTION

Comme précisé ci-dessus, le projet Neurodys a été initié notamment afin d'étudier les problèmes d'apprentissages chez des enfants européens. La participation à ce projet nous donna l'opportunité d'étudier la discrimination de la parole chez des enfants dyslexiques compa-

rativement à des enfants contrôles, en utilisant des voyelles natives (Langue Française) et des voyelles non-natives (en Finnois, Allemand et Hongrois), et leur équivalent digitalisés. En effet, il est plutôt naturel de penser qu'un enfant au cours de son développement, donc constamment exposé aux sons de sa langue maternelle, va développer une sorte de spécialisation, tant comportementale que cérébrale, pour ces sons comparativement aux sons d'autres langues. Il semblerait que ce processus puisse être altéré chez les enfants dyslexiques.

6.2 ARRIÈRE-PLAN THÉORIQUE

Nous l'avons vu, la dyslexie est caractérisée par une lecture affaiblie, malgré des capacités intellectuelles normales et un contexte socio-éducatif non altéré [270]. Alors que les origines cérébrales restent incertaines et résultent probablement de facteurs génétiques [98], une des principales théories suppose un déficit des représentations phonologiques comme caractéristique cognitive principale des dyslexiques [29, 231]. Récemment, cette théorie phonologique a été réévaluée par Ramus et Szenkovits [304]. Ces auteurs ont montré que le déficit de type phonologique n'apparaissait seulement que lors de tâches qui saturaient les capacités de la mémoire de travail. Ils en déduisirent que la dyslexie affecte plus l'accès conscient aux représentations phonologiques que la connaissance phonologique en elle-même. Ce déficit d'accès phonologique pourrait être conceptuellement proche de la théorie du déficit d'ancrage proposée par Merav Ahissar [5]. Cette théorie suggère que, comme nous l'avons vu dans l'état de l'art, les dyslexiques échouent dans leur tentative à générer un contraste entre un son de référence (une « ancre » perceptuelle) et d'autres sons proposés en comparaison dans une tâche de discrimination. De manière similaire, en utilisant des tâches de perception visuelle, Sperling et collaborateurs [286] conclurent que le déficit à l'origine de la dyslexie n'est pas nécessairement lié au système magnocellulaire, mais réside plutôt dans la performance lorsque les items utilisés dans les tâches sont bruités, dans leur propres termes, un déficit en « exclusion du bruit perceptuel ». Tous ces résultats semblent apporter une vision nouvelle et plus déterminée de la théorie du déficit phonologique. Toutefois, il a été proposé que les problèmes phonologiques ont leur origine dans un déficit auditif plus général, particulièrement lié à la discrimination des transitions acoustiques brèves [307, 339]. Cette théorie des processus auditifs rapides fut par la suite étendue à la perception de changements rapides et courts d'éléments du langage, tel que les transitions formantiques des consonnes, ces transitions se faisant en un temps généralement inférieur à 50 ms [308, 310]. Bien que la théorie des processus auditifs rapides ait été étudiée depuis longtemps, il n'existe aucune évidence forte quant à son caractère explicatif des troubles dyslexiques. En effet, seule une partie des enfants souffrant de dyslexie ou bien de trouble sévère d'apprentissage, parfois plus de 50%, ne présentent aucun déficit auditif tel que décrit par la théorie (pour une revue, voir [185]). Plusieurs explications ont été avancées sur l'origine de ces divergences. Par exemple, il a été suggéré que le déficit temporel de traitement auditif joue un rôle causal dans la dyslexie, mais seulement dans un sous-groupe de dyslexiques [307], ou bien encore que les performances des enfants aux tâches de perception auditive pourraient être influencées par des facteurs non-perceptuels, tels qu'un déficit attentionnel, ou

un effet « top-down » résultant en une catégorisation explicite mais impromptue des stimuli, donnant alors une impression de discrimination altérée [12]. En dépit de ces résultats contradictoires, des liens entre les déficits à des tâches de discrimination auditive et des problèmes d'apprentissage verbal continuent d'être découverts et ont besoin d'être expliqués.

Bien que la majeure partie des études se focalisant sur la dyslexie chez l'enfant ou l'adulte utilisèrent des techniques d'expérimentation comportementales, certaines études ont également employé la technique d'imagerie cérébrale par potentiels évoqués (voir annexe B) [106, 107]. La découverte d'un indicateur neurophysiologique de la discrimination auditive cérébrale, la MMN, a rendu possible l'accès à la mémoire sensorielle auditive, indépendamment de la conscience du sujet à effectuer une tâche. Cette composante est basée sur une trace mémorielle formée par la répétition d'un stimulus que l'on appelle standard, et est générée quand un stimulus appelé déviant ne correspond pas à cette trace mémorielle [209, 175, 221]. Cette MMN est censée représenter une détection automatique d'un changement, et dont le pic (amplitude maximale) se situerait approximativement entre 150 et 200 ms après le début du nouveau stimulus (ou déviant). L'attention du sujet n'est pas requise afin d'obtenir une MMN. Certaines études ont montré qu'une meilleure discrimination, en tâches comportementales, était associée à une amplitude de MMN plus importante [142]. Il a également été montré que la MMN obtenue chez des enfants est largement comparable à celle obtenue chez des adultes [50, 53], même si des légères variations dans la localisation et/ou l'orientation des sources à l'origine de la MMN chez les enfants peut engranger de légères différences d'amplitudes (plus élevées chez les enfants) et de latence (plus courtes chez les adultes) du pic [182] (pour une revue de la MMN, voir Näätänen [210]).

En étudiant des enfants atteints d'un déficit d'apprentissage du langage, Kraus et collaborateurs [142] trouvèrent une corrélation significative entre la performance à des tâches de discrimination auditives et des mesures faites sur la MMN. D'autres équipes tentèrent de reproduire ces résultats avec plus ou moins de succès. Dans une revue récente, Bishop [28] compara 12 études utilisant des stimuli verbaux. L'auteur conclut que la relation entre performances comportementales et MMN n'est en fait pas aussi clair que le laissait entendre l'étude de Kraus [142]. En effet, aucune des 12 études comparées ne rapporta de corrélation significative entre un seuil de discrimination auditive comportementale et l'ampleur de la MMN obtenue à l'aide des mêmes stimuli. Bishop suggéra que des facteurs externes devaient être pris en compte, tel que le niveau de performance en langage oral ; de plus, l'auteur recommanda l'utilisation de stimuli différents que ceux traditionnellement utilisés, c'est à dire l'association d'une consonne et d'une voyelle (par exemple /ba/ versus /ga/).

La théorie du déficit auditif des transitions rapides prévoit également des déficiences de discrimination de sons non-verbaux, si ceux-ci impliquent des brefs changements acoustiques. Bishop compara également entre elles 5 études utilisant des stimuli non-verbaux. Seule une de ces études montra une MMN atténuée chez des sujets atteints de déficits en alphabétisation, lorsque les sons déviants étaient différents des standards soit par leur durée, soit par le moment d'apparition. Toutefois, aucune de ces études ne fit de comparaison directe entre

stimuli verbaux et non-verbaux.

Il est de nos jours relativement admis que la perception catégorielle du langage se construit au fur et à mesure du développement naturel de l'enfant, sous l'influence de son environnement verbal. Un nouveau né peut en effet discriminer virtuellement toutes les unités phonétiques de tous les langages existant dans le monde [24]. Six mois après sa naissance, cette capacité phonétique universelle disparaît peu à peu jusqu'à ce que la discrimination de contrastes phonétiques non-natifs devienne très problématique [133]. Les processus sous-tendant cette spécialisation très spécifique sont encore débattus ; trois principaux modèles émergent de la littérature :

1. Le modèle de Werker, se concentrant sur les habiletés cognitives [343].
2. Le modèle d'assimilation perceptuelle de Best [24].
3. La théorie de l'aimant natif du langage proposée par Kuhl [144, 145].

Ce processus de modifications de la perception phonémique semblerait être altéré chez les personnes atteintes de dyslexie. En effet, un grand nombre d'études ont mis en évidence un déficit en discrimination perceptuelle de sons verbaux chez des personnes atteintes de dyslexie développementale [44, 65, 236, 261]. Plus précisément, ces études ont montré que le pic de discrimination phonémique était moins élevé chez les sujets dyslexiques, comparativement à des sujets contrôles du même âge. Toutefois, le peu d'études qui utilisèrent à la fois des contrôles du même âge et des contrôles d'un niveau de lecture équivalent échouèrent dans la mise en relief de tels résultats pour la comparaison entre dyslexiques et contrôles du même niveau de lecture. (voir par exemple Manis & Keating [179]).

Considérant ces différents résultats, Serniclaes suggéra que les dyslexiques souffriraient d'un autre type de déficit en perception catégorielle, déficit se situant plus au niveau d'une sur-discrimination au sein de catégories phonémiques, ajoutée à une discrimination diminuée des stimuli se situant à la frontière phonétique [261]. Dès lors, les enfants dyslexiques montreraient une plus grande sensibilité pour la distinction phonétique entre différents stimuli appartenant à la même catégorie de phonèmes [262] aussi appelés « allophones », ces différences persistant pour les langues étrangères. Au lieu d'être progressivement réduit au cours du développement de l'enfant, ce mode allophonique de perception verbale continuerait d'être très actif chez les enfants dyslexiques.

Dans l'étude que je présente ici, en accord avec les recommandations de Bishop [28], nous avons comparé la MMN obtenue grâce à l'utilisation de sons simples verbaux et non-verbaux chez de enfants atteints de dyslexie développementale, comparativement à des enfants contrôles du même âge ; ceci, au sein d'un projet de recherche Européen translinguistique sur la dyslexie (le projet "Neurodys" : www.neurodys.com). Ce projet nous donna l'opportunité d'étudier l'influence de contrastes phonémiques natifs et non-natifs sur la MMN. Le présent travail représente la « partie Française » d'une plus vaste étude réalisée au sein de 4 pays européens, les trois autres centres se situant, comme précisé dans le début de ce chapitre, en Finlande, en Allemagne et en Hongrie.

L'ensemble des 4 équipes européennes choisit les voyelles /y/ et /i/ afin d'obtenir un contraste favorable à l'apparition d'un phénomène de

MMN. Une analyse phonétique de la structure formantique des voyelles /i/ montra qu'il existe peu voire pas du tout de différence entre les 4 différentes langues. La voyelle /i/ fut donc considérée comme translinguistiquement invariante, et une même variante particulière de cette voyelle fut donc utilisée au sein des différents laboratoires. Par contre, la même analyse effectuée sur la voyelle /y/ montra que celle-ci diffère entre les langues de par la variation de ses trois premiers formants (F1, F2 et F3) (voir la section méthode ci-dessous pour plus de détails), à ceci près que les /y/ Finlandais et Hongrois furent très proches. Le paradigme expérimental fut donc basé sur l'obtention d'un effet **MMN** à l'aide d'un son standard, un /i/ Européen, relativement à un /y/ natif ou non-natif.

En tant que centre Français, nous avons tout d'abord cherché à regarder quels effets différentiels les stimuli non-natifs pouvaient avoir sur l'amplitude et la latence de la **MMN**, comparativement aux stimuli natifs. Ces stimuli non-natifs ayant été reconnus comme faisant parti de la catégorie des /y/ par les sujets Français, de telles différences refléteraient donc des variances intra-catégorielles du même phonème /y/. Nous avons ensuite regardé les différences potentielles sur la **MMN** entre les sons verbaux et leurs équivalents non-verbaux. Enfin, nous avons décidé d'étudier les possibles corrélations existantes entre l'amplitude et/ou la latence de la **MMN** et les performances des sujets à des tâches métaphonologiques, ce qui fut décrit comme étant non-résolu dans la revue de Bishop [28].

ETUDE 2 : MÉTHODOLOGIE UTILISÉE

7.1 LES PARTICIPANTS DE L'ÉTUDE

48 enfants dyslexiques et 47 enfants contrôles furent inclus dans l'étude. Tous les sujets avaient une audition correcte pour les deux oreilles, mesurée grâce à un audiomètre, aucune déficience neurologique, aucune blessure à la tête ni aucune médication continue. Les parents des enfants signèrent un consentement avant l'expérimentation. L'âge de lecture des sujets fût calculé grâce au test de l'alouette [153]. Les enfants dyslexiques devaient avoir un retard au moins équivalent à 18 mois et les enfants contrôles pouvaient avoir un retard inférieur à 1 an. Les capacités cognitives furent évaluées grâce à 5 sous-tests de la batterie WISC-IV [342]. Tous les enfants devaient avoir un QI de performance supérieur à 85, évalué grâce au test des cubes et de la matrice. Afin d'être considéré comme un sujet contrôle, les enfants devaient avoir moins d'une déviation standard au score du test de lecture de mots ODEDYS [135], et les dyslexiques devaient avoir plus de 1.25 déviation standard au même score. Les habiletés métaphonologiques furent testées grâce à une tâche de suppression de phonèmes, et une tâche de contrepèterie, ces deux tâches furent également chronométrées :

- Dans la tâche de suppression de phonèmes, 12 items de type CVC et 12 items de type CCV furent utilisés. L'enfant devait effacer mentalement la première consonne et prononcer les deux dernières lettres. Par exemple, le mot 'FUR' devient 'UR'.
- Dans la tâche de contrepèteries, l'enfant devait inverser le premier phonème de deux mots présentés oralement par l'expérimentateur. Par exemple, le couple 'Banane-Ficelle' devient 'Fanane-Bicelle'. 10 items composent ce test.

La table 19 résume les caractéristiques des sujets des deux groupes ainsi que leur score moyen aux différents tests.

7.2 LES DIFFÉRENTS STIMULI UTILISÉS

Afin de tester la MMN dans la dyslexie au travers de différentes langues européennes (Allemand, Finnois, Français et Hongrois), il fut décidé de créer un set de stimuli composé de voyelles et de leur équivalents non-verbaux. Ce set de stimuli consiste en 4 voyelles synthétiques (3 voyelles /y/ et une voyelle /i/) et 4 stimuli non-verbaux complexes qui sont 5 sons de type sinusoïde localisés à des fréquences correspondant aux 5 formants les plus bas des voyelles synthétiques.

Originellement, un set de 135 voyelles synthétiques fût créé, couvrant tout l'espace formantique du /y/ et entourant la frontière moyenne et haute des voyelles Allemandes, Finlandaise, Françaises et Hongroises (120 désignées comme /y/ et 15 essais désignés comme /i/, /e/ et /oe/). Ces stimuli furent utilisés afin d'évaluer les frontières phonémiques et la qualité (acceptabilité) des voyelles par un groupe d'adultes natifs de chaque pays (17 Allemands, 20 Finlandais, 20 Français et 20 Hongrois tous natifs pour les stimuli). De ce set, tous les stimuli qui furent identifiés comme étant des /y/ à plus de 90% furent analysés

	DYSLEXIQUES	CONTRÔLES	VALEURS T ET P
Age (mois)	119.1(12.8)	120.1(12.4)	-0.4 n.s.
Age_lec(mois)	87.6(7.3)	128.5(23.3)	-11.3 < .001
Phon_del	16.7(5.2)	22.3(2.7)	-6.5 < .001
Time_phon(sec)	123.9(50.3)	71.8(23.8)	6.4 < .001
Spoon	2.9(2.6)	7.9(1.8)	-10.3 < .001
Time_spoon(sec)	239.7(52.6)	138.7(52.8)	9.04 < .001

TAB. 19: Caractéristiques des sujets ainsi que leur scores moyens aux tests comportementaux et les valeurs correspondantes T et P provenant des two sample t-test effectué entre les deux groupes (dl=93). Age_lec désigne l'âge de lecture, Phon_del désigne le score au test de suppression de phonèmes, Time_phon est le temps mis pour réaliser cette tâche, Spoon désigne le score obtenu à la tâche de contrepèterie et enfin, Time_spoon désigne le temps mis pour effectuer la tâche de contrepèterie. Les déviations standards des scores moyen figurent entre parenthèse.

VOYELLE	F1	F2	F3	F4	F5
euro-i	335	2638	3500	4500	5500 ...
Fr /y/	250	2086	2400	4500	5500 ...
Ge /y/	250	2018	2400	4500	5500 ...
Fi/Hu /y/	274	1886	2400	4500	5500 ...

TAB. 20: Fréquences des formants utilisés dans les stimuli verbaux. Fr désigne la voyelle Française, Ge la voyelle Allemande et Fi/Hu la voyelle Finlandaise-Hongroise.

pour leur qualité. Pour chacun des 4 groupes d'adultes, une voyelle reçut le meilleur score (c'est à dire la voyelle pour laquelle les sujets pensent qu'elle représente le mieux celle de leur langue maternelle) et fut sélectionnée pour faire partie du set de stimuli utilisés en potentiels évoqués dans cette étude. Le résultat montra que les sujets Finlandais et Hongrois avaient la préférence pour la même voyelle, donc seulement 3 voyelles /y/ furent choisies : une Finlandaise-Hongroise, une Française et une Allemande. Une voyelle commune appelée euro /i/ fût synthétisée afin de représenter la moyenne des fréquences de formant d'un /i/ « typique » des 4 langues.

Toutes ces voyelles se distinguent par la fréquence des trois premiers formants (représentés en table 20).

Pour la voyelle /i/, 6 formants additionnels (du formant 4 au 9) furent utilisés et localisés à 4500, 5500, 6500, 7500, 8500 et 9500 HZ. Pour toutes les voyelles /y/, 7 formants communs additionnels (formant 4 à 10) furent utilisés à 3500, 4500, 550, 6500, 7500, 8500 et 9500 Hz. Les stimuli furent synthétisés au moyen du logiciel Praat [37]. Voir figure 6 pour une vision du spectre à court-terme des différentes voyelles ¹.

Les stimuli non-verbaux furent créés en synthétisant 5 sons en ondes

¹ D'abord, la source gutturale fut créée en convertissant l'information tonale et temporelle en un signal source guttural (0.1% de bruit fut ajouté afin de rendre le signal plus naturel). La durée du signal source était de 150 ms et la tonalité tomba linéairement de 230 HZ au début du son à 200 Hz à la fin du son (moyenne : 215 Hz). La source fut alors

sinusoïdes séparées aux fréquences correspondant aux pics des 5 premiers formants des voyelles précédemment décrites. L'amplitude de ces 5 sons sinusoïdes fut harmonisée selon les valeurs des amplitudes obtenues pour les voyelles dans le logiciel Praat. Finalement, ces 5 sinusoïdes furent combinées pour créer un son complexe. Voir figure 7 pour une vision du spectre à court-terme des stimuli non-verbaux. Un ton aux caractéristiques féminines fut utilisé pour tous les stimuli. La durée de tous les stimuli, verbaux et non-verbaux est de 150 ms.

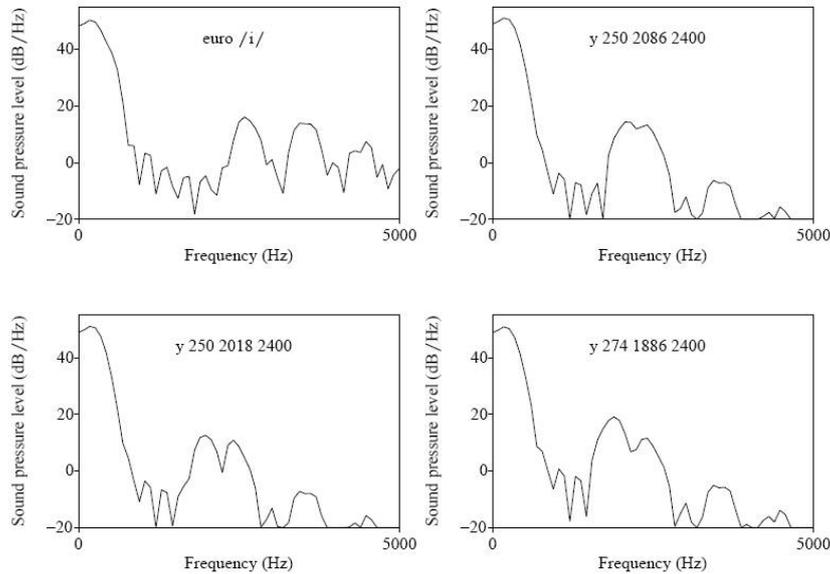


FIG. 6: Le spectre sonore à court-terme des stimuli verbaux utilisés dans l'expérience en potentiels évoqués. Respectivement de la gauche vers la droite et de haut en bas : le /i/ européen, le /y/ Français, le /y/ Allemand et le /y/ Finlandais-Hongrois.

7.3 PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

Les potentiels évoqués furent enregistrés au moyen d'un paradigme typique de type Oddball pour 6 conditions au total : 3 pour les stimuli verbaux, 3 pour les stimuli non-verbaux. Dans chaque condition, le /i/ européen fut utilisé comme son standard et un des /y/ comme son déviant. Les 3 conditions utilisant les stimuli non-verbaux furent présentées en premier à tous les enfants, afin d'éviter qu'ils n'interprètent ces stimuli non-verbaux comme du langage. L'ordre des conditions était contre-balancé à chaque enfant.

Pour chaque condition, un total de 702 stimuli furent présentés à chaque sujet, avec une proportion de 18%/82% de stimuli déviants/-standards, avec un intervalle inter stimuli pseudo-randomisé de 600-700 ms (moyenne : 650 ms). L'ordre des stimuli au sein de chaque condition était également pseudo-randomisé (avec 3 à 13 stimuli standards entre deux stimuli déviants). Les enfants, avaient la possibilité d'avoir une pause, entre chaque condition, quand il/elle le voulait, ainsi qu'un goûter au milieu de l'expérience. Tous les sons furent délivrés aux enfants à un niveau sonore de 80 dBC, avec l'utilisation d'un casque

filtrée avec un modèle d'étendue vocale contenant l'information sur les fréquences et les bande-passante des 10 premiers formants (i.e., les résonances de l'étendue vocale)

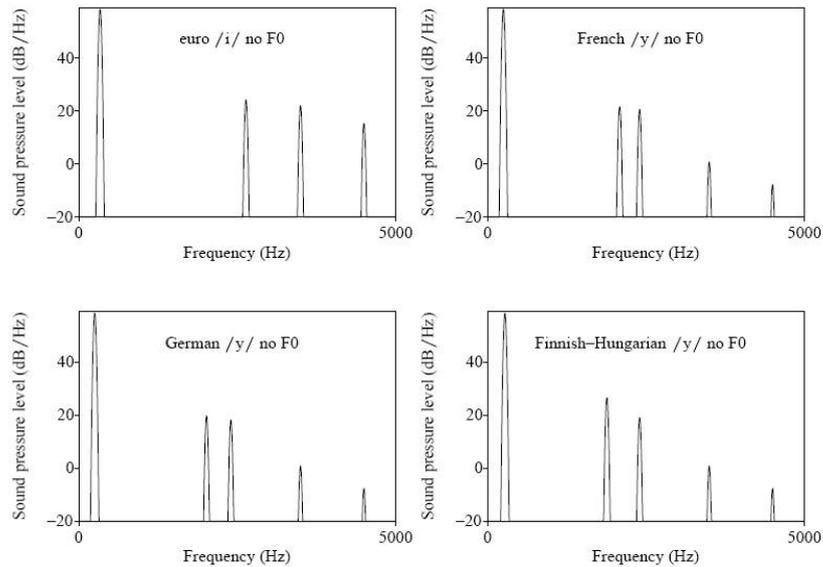


FIG. 7: Le spectre sonore à court-terme des stimuli non-verbaux utilisés dans l'expérience en potentiels évoqués. Respectivement de la gauche vers la droite et de haut en bas : le /i/ européen, le /y/ Français, le /y/ Allemand et le /y/ Finlandais-Hongrois.

audio de marque Sennheiser™(Modèle PX-100BC).

L'expérience fut réalisée à l'aide du logiciel Presentation®(version 0.70, www.neurobs.com). La consigne donnée aux enfants était de ne pas écouter les sons. Un documentaire animalier spécialement choisi pour son caractère reposant fut montré à chaque enfant tout au long de l'expérience, sans le son.

7.4 ENREGISTREMENT DES POTENTIELS ÉVOQUÉS

L'EEG fut enregistrée avec un filtre de 0.1-100 Hz, et un taux d'échantillonnage de 500 Hz à l'aide du logiciel Neuroscan V4.2 et un bonnet Neuroscan de 32 électrodes (électrodes en Ag-AgCl). Les impédances des toutes les électrodes furent maintenues en dessous de 5 k Ω . L'électrode située au vertex fut choisie comme électrode de référence. Les mouvements oculaires furent contrôlés grâce à deux électrodes : une placée au dessus de l'oeil gauche et l'autre placée sur la tempe droite. Les epochs contaminés par des mouvements oculaires ou des artefacts d'origine non-biologique et produisant un voltage plus large que +/- 125 μ V (pic-à-pic) furent écartés de la moyenne. Les potentiels évoqués furent digitalement filtrés avec un filtre passe-bas de 30 Hz (12 dB/Octave, filtre de type Zerophase) et un filtre passe-haut de 0.3 Hz (12 dB/Octave, filtre de type Zerophase). Les potentiels évoqués furent obtenus par le calcul de la moyenne des epochs séparément pour chaque stimulus déviant et pour chaque stimulus standard qui précède un stimulus déviant. L'analyse des epochs commence 50 ms avant l'apparition du stimulus et se termine 600 ms après son apparition. Une correction de niveau de référence fût appliquée pour la période allant de -50 ms à 0 ms. On appliqua ensuite la référence moyenne à tous les potentiels évoqués. Les participants ayant un minimum de 70 epochs acceptés par type de stimulus et ce pour chaque condition

En EEG, un epoch correspond à la réponse électrophysiologique à un stimulus.

furent inclus dans l'échantillon. La courbe **MMN** fût obtenue par la soustraction de la courbe obtenue correspondant aux stimulus standard à celle obtenue correspondant au stimulus déviant (En résumé, $MMN = \text{déviant} - \text{standard}$).

7.5 ANALYSES

Les électrodes montrant les meilleures réponses **MMN** selon la littérature [50] furent choisies pour les analyses de résultats. Il s'agit des électrodes F3, F4, C3 et C4. Un script de détection automatique de pic fut utilisé sur ces électrodes afin de déterminer, pour chaque courbe, l'amplitude et la latence du pic **MMN** (détection de l'amplitude négative la plus importante dans la fenêtre temporelle : 80-280 ms).

Le logiciel SPSS fût utilisé pour toutes les analyses statistiques [1].

Pour les corrélations réalisées avec les tâches de conscience phonologique, deux nouvelles variables furent calculées. Premièrement, tous les scores et les temps (obtenus pour les tâches de suppression de phonème et de contrepèterie) furent normalisés (on retranche la moyenne et on divise le tout par la déviation standard, suivant la même méthode appliquée dans la première étude, voir chapitre 4) afin d'égaliser le poids de chaque variance. Deuxièmement, une Analyse en Composantes Principales (**ACP**) fût effectuée sur chacune des deux tâches, en effet, pour chacune des tâches le score et le temps furent enregistrés ce qui résulte en des mesures quelque peu redondantes. La mesure de Kaiser-Meyer-Olkin vérifia la compatibilité de l'échantillon à l'analyse, $KMO = 0.5$ pour les deux **ACP**, ce qui équivaut à la limite acceptable [?]. Le test de sphéricité de Bartlett, respectivement $\chi^2 = 68.828$, $p < 0.0001$ and $\chi^2 = 65.553$, $p < 0.0001$ indique que les corrélations entre items furent suffisamment larges pour appliquer une **ACP**. Une mesure initiale fut effectuée afin d'obtenir les valeurs propres pour chaque composante. Seule la première composante résultant de chacune des deux **ACP** eut une valeur supérieure à 1 (critère de Kaiser). Ces deux premières composantes expliquèrent respectivement 86.3% et 86.4% de la variance totale. Ensuite, des corrélations bivariées furent faites entre les caractéristiques de la **MMN** (amplitude et latence du pic) et les caractéristiques comportementales de chacun des sujets (âge, âge de lecture, composantes **ACP**).

ETUDE 2 : RÉSULTATS

8.1 ANALYSE DES STIMULI STANDARDS VS STIMULI DÉVIANTS

Les courbes de grande moyenne des potentiels évoqués pour chaque son, ainsi que pour chaque groupe, dyslexiques et contrôles, sont dépeintes dans la figure 8

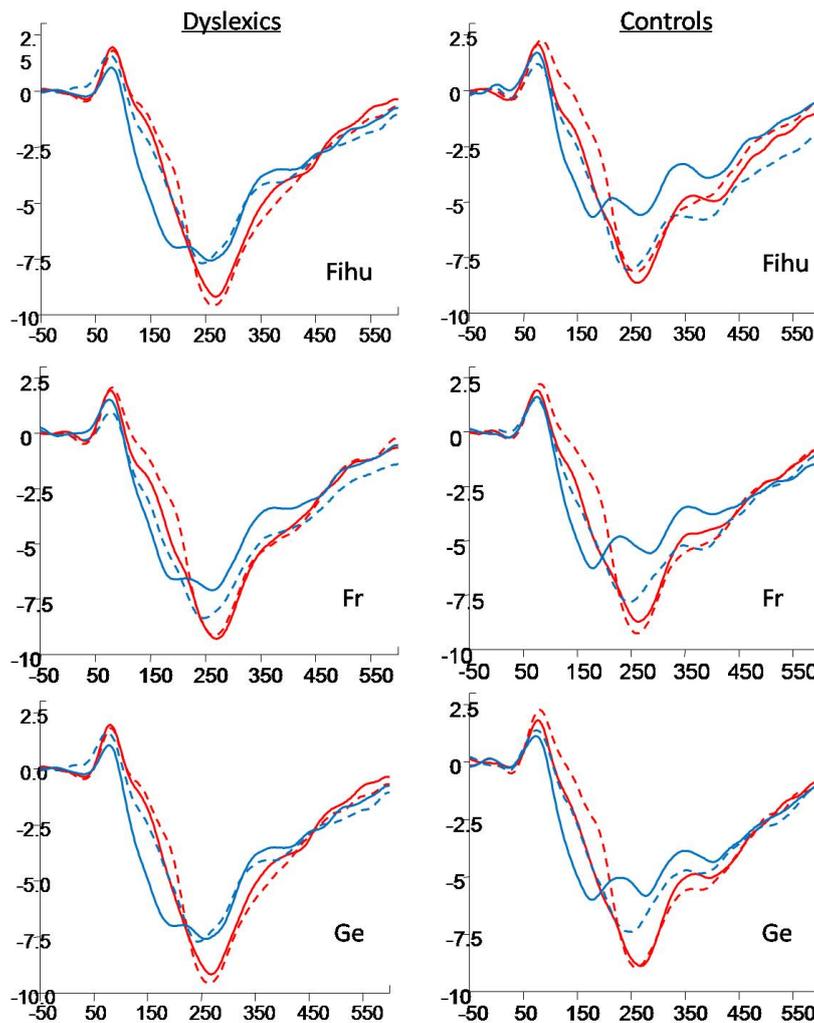


FIG. 8: Grandes moyennes des potentiels évoqués pour les stimuli standards (courbe rouge) versus stimuli déviants (courbe bleue) pour l'électrode fronto-centrale Fz. Les sons verbaux sont représentés par une courbe hachurée, et les stimuli non-verbaux par une courbe pleine. Les courbes pour le groupe des dyslexiques sont à gauche et celles pour le groupe des contrôles sont à droite. Respectivement de haut en bas : Stimuli Finlandais/Hongrois, Français et Allemand. L'amplitude (ordonnée) est en μV , le temps (abscisse) est en ms.

Les stimulus déviants semblent générer une amplitude plus importante de MMN que les stimuli standards. On peut noter que à la fois

		F3	F4	C3	C4
Dyslexiques	Fi/Ho NV	120-200	114-212	118-190	98-200
	Fi/Ho V	138-228	88-232	122-224	116-224
	Français NV	132-208	116-210	110-190	64-196
	Français V	72-224	78-218	54-222	94-222
	Allemand NV	110-214	104-202	118-198	76-200
	Allemand V	124-210	86-224	112-212	88-222
Contrôles	Fi/Ho NV	122-186	118-186	114-174	98-188
	Fi/Ho V	74-224	126-224	132-212	126-216
	Français NV	114-184	122-192	114-174	110-180
	Français V	116-212	70-220	110-208	72-218
	Allemand NV	122-180	108-190	118-178	76-188
	Allemand V	80-206	76-218	126-190	84-222

TAB. 21: Fenêtres temporelles (en ms) des différences significatives, calculées par t-test ($p < 0.05$) point par point, entre courbe standard et courbe déviant, pour chaque groupe et pour chaque condition, aux 4 électrodes considérées. V désigne les stimuli verbaux et NV désigne les stimuli non-verbaux. Une fenêtre temporelle marquée en gras marque une fenêtre plus précoce pour la comparaison verbale vs non-verbal.

les stimuli standards verbaux et non-verbaux ont l'air similaires, alors que pour les stimuli déviants, la courbe des sons verbaux à l'air d'être décalée sur la droite (donc dans le temps) par rapport à la courbe des sons non-verbaux.

Allons plus avant dans la comparaison de ces courbes et effectuons un two sample t-test point par point entre les courbes déviants et les courbes standards. Les résultats de ce test sont affichés dans la table 21.

Analysons ces résultats de plus près et regardons langage par langage :

- Pour les stimuli français, pour le groupe contrôle, on peut voir que la fenêtre est plus précoce en F4 et en C4, donc pour l'hémisphère droit, pour les stimuli verbaux, alors qu'il n'y aucune différence entre verbal et non-verbal pour les deux autres électrodes. Pour le groupe dyslexique, la fenêtre arrive de manière précoce pour les stimuli verbaux dans toutes les électrodes sauf en C4. La distinction entre sons verbaux et non-verbaux se fait donc dans les deux hémisphères, l'ordre temporel des fenêtres étant inversé en C4 par rapport au groupe contrôle.
- Pour les stimuli allemands, dans le groupe contrôle, on peut encore apercevoir une dichotomie relativement claire. La fenêtre arrive de manière précoce pour les sons verbaux en F3 et F4 c'est à dire en frontal, alors qu'elle arrive de manière précoce pour les sons non-verbaux en C3 et C4 c'est à dire en régions centrales. Toutefois la différence temporelle de fenêtre est moins importante en C3 et C4. Chez les dyslexiques, le pattern est moins clair. On assiste à une similarité avec le groupe contrôle en F4 et C4, mais un effet

inverse en F3 et C3/ L'hémisphère gauche réagit donc ici à l'inverse de celui des contrôles.

- Pour les stimuli Finlandais/Hongrois, chez les contrôles, la fenêtre pour les stimuli verbaux arrive de manière précoce uniquement en F3, et la fenêtre pour les stimuli non verbaux arrive de manière précoce dans les trois autres électrodes. Chez les dyslexiques on assiste au même phénomène sauf que la précocité pour les stimuli verbaux ne se situe pas cette fois en F3 mais en F4. On a donc ici une inversion de phénomène en frontal, par rapport au groupe contrôle.

Les résultats de cette analyse seront plus amplement analysés dans la partie discussion (chapitre suivant).

8.2 ANALYSE DES CARACTÉRISTIQUES DE LA MMN

Les courbes MMN (obtenues après soustraction de la courbe des stimuli déviants et de celle des stimuli standards) sont dépeintes dans la figure 9. On peut d'ores et déjà remarquer que pour le groupe contrôle,

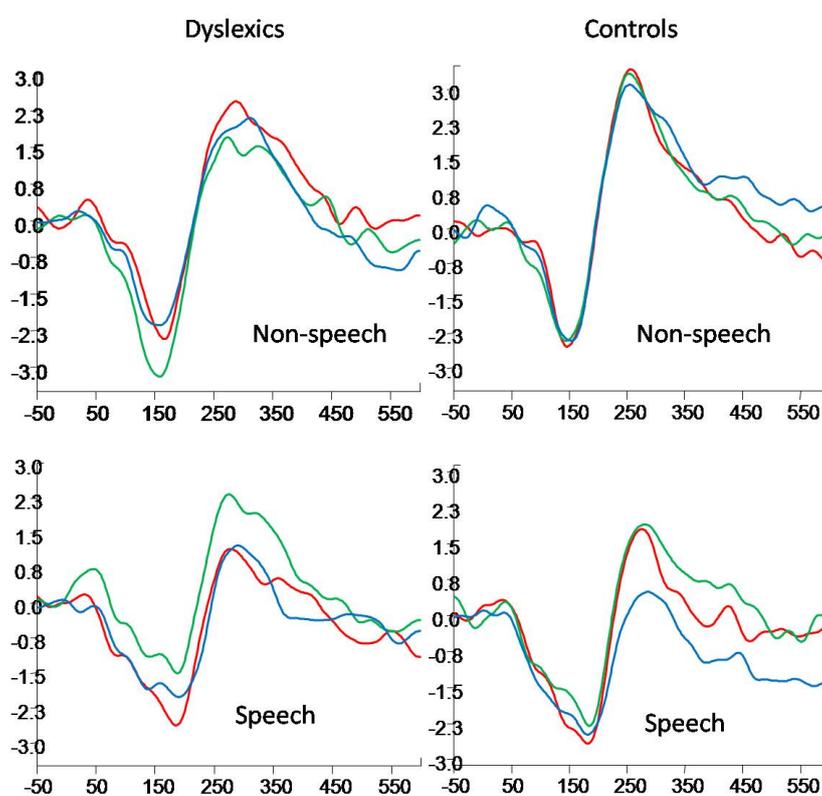


FIG. 9: Courbes des MMN pour tous les stimuli et pour les deux groupes de sujet, enregistrées à l'électrode Fronto-centrale Fz. En haut figurent les courbes des stimuli non-verbaux (non-speech) et en bas celles des stimuli verbaux (speech). Les courbes pour le groupe dyslexique sont à gauche et celles pour le groupe contrôle sont à droite. La courbe correspondant aux stimuli Finlandais-Hongrois est en bleue, celle correspondant aux stimuli Français est en rouge et enfin, celle correspondant aux stimuli Allemands est en vert. L'amplitude (ordonnée) est en μV , le temps (abscisse) est en ms.

le pic de la MMN a une apparence similaire pour les stimuli natifs et

non-natifs, que ce soit en verbal ou en non-verbal. Alors que chez les dyslexiques, il semblerait que les stimuli non-verbaux allemands produisent un pic de plus grande amplitude que les deux autres stimuli non-verbaux, et que les stimuli verbaux Français produisent un plus grand pic que les autres stimuli verbaux. Les latences de pic ont l'air similaires, dans les deux groupes, et pour tous les stimuli. Une analyse par two sample t-test ne révèle aucune différence significative (dans la fenêtre temporelle de la MMN, c'est à dire entre 80 et 280 ms) entre groupe dyslexique et groupe contrôle, pour chaque type de stimulus. Toutefois, comme les amplitudes et les latences ont l'air de se différencier d'une langue à l'autre, il semble nécessaire d'effectuer une analyse statistique plus poussée.

8.2.1 Comparaison de l'amplitude du pic entre dyslexiques et contrôles

Une ANOVA à mesures répétées construite sur le modèle : Langage (Allemand, Finlandais/Hongrois ou Français) X Verbalité (verbal ou non-verbal) X Electrode (F₃, F₄, C₃, C₄) avec le groupe de sujets (dyslexique ou contrôle) comme facteur inter-sujet montra que seul le facteur électrode était significatif ($F(3,93) = 19.82, p < 0.001$). Le test de sphéricité de Mauchly était non-significatif pour chacune des composantes.

Afin d'explorer plus avant, une ANOVA à une voie avec le groupe de sujet comme facteur et les amplitudes de pic MMN comme variables dépendantes fut calculée. Cette analyse montra qu'il y a une différence entre dyslexiques et contrôles que sur l'électrode F₃, pour les stimuli Allemands non-verbaux (amplitude plus importante pour les dyslexiques) ($F(1,93) = 7.288, p < 0.01$).

Afin d'étendre les analyses des effets entre conditions et entre groupes, et de visualiser de manière globale les résultats, des barres d'erreur (avec un intervalle de confiance de 95% furent calculées, et ce, pour les amplitudes du pic de MMN. Les résultats sont visibles en figure 10.

De manière générale, ces barres d'erreur montrent peu de différence entre les stimuli natifs et non-natifs au sein d'un même type de stimulus (verbal ou non-verbal). Toutefois en F₃, comme mentionné précédemment, on peut voir une amplitude plus importante (c'est à dire plus négative) de MMN pour le stimulus Allemand non-verbal pour le groupe des dyslexiques, comparativement au groupe contrôle. De plus, la MMN est moins marquée pour les stimuli Français et Finlandais-Hongrois. Par contraste, pour les stimuli verbaux équivalents, un pattern différent peut être observé, dans lequel il semble exister un ordre entre les stimuli. En effet, le stimulus Français semble créer la MMN la plus ample, et le stimulus Finlandais-Hongrois la plus faible, le stimulus Allemand étant un intermédiaire.

Sur une autre électrode (C₄), on peut apercevoir que la MMN est plus ample pour le son non-verbal natif que pour les non-natifs dans le groupe contrôle.

8.2.2 Comparaison de la latence du pic entre dyslexiques et contrôles

La même ANOVA à mesures répétées faite précédemment avec les amplitudes de pic fut recalculée ici, mais avec cette fois-ci les valeurs des latences de pic. Le résultat montra les facteurs suivant comme étant

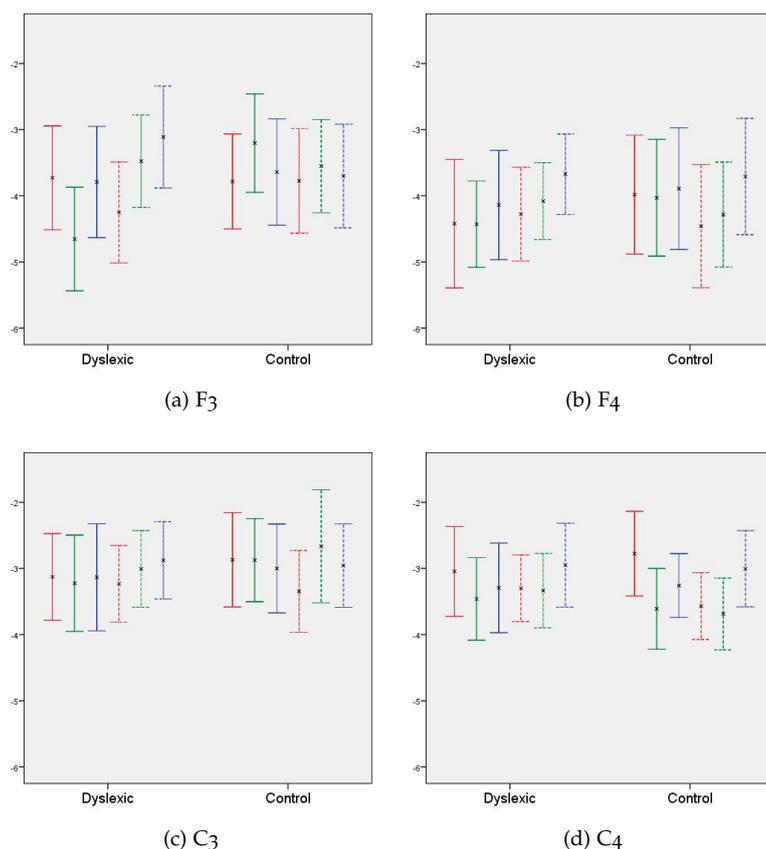


FIG. 10: Amplitudes des pics MMN pour chaque stimuli, pour chaque électrode et pour chaque groupe. Ces amplitudes sont représentées au moyen de barres d'erreur avec un intervalle de confiance de 95%. L'ordonnée représente l'amplitude en μV (de $-1.5 \mu\text{V}$ en haut à $-6 \mu\text{V}$ en bas). Les stimuli non-verbaux sont représentés à l'aide de traits pleins, les stimuli verbaux à l'aide de traits hachurés. Les stimuli Français sont représentés en rouge, les Allemands en vert et les Finlandais-Hongrois en bleu.

significatifs : Verbalité ($F(1,93) = 22.595$, $p < 0.001$), Electrode ($F(3,93) = 5.9$, $p < 0.001$) et Verbalité X Electrode ($F(3,93) = 3.79$, $p < 0.01$). De même, le test de sphéricité de Mauchly ne fut pas significatif, pour aucun des facteurs.

Une ANOVA à une voie fut également calculée sur le même modèle que celle réalisée avec les amplitudes de pic mais cette fois-ci avec les latences de pic. Elle révéla que certains stimuli ont une latence de pic plus importante chez les dyslexiques que chez les contrôles. Ce fut le cas en F4, pour le stimulus Finlandais/Hongrois non-verbal ($F(1,93) = 4.047$, $p < 0.05$) et pour le stimulus Français non-verbal ($F(1,93) = 4.431$, $p < 0.05$); en C3, également pour le stimulus Finlandais/Hongrois non-verbal ($F(1,93) = 6.442$, $p < 0.05$). Ces différences peuvent être visualisées en figure 11. On peut également remarquer qu'en F3 et en C4, pour le groupe d'enfants dyslexiques, les stimuli verbaux Allemands produisent une MMN d'une latence plus faible que les stimuli Français et Finlandais-Hongrois. De plus, en C4, pour le groupe contrôle, les stimuli non-verbaux semblent produire des pics de MMN d'une latence plus faible que les stimuli verbaux.

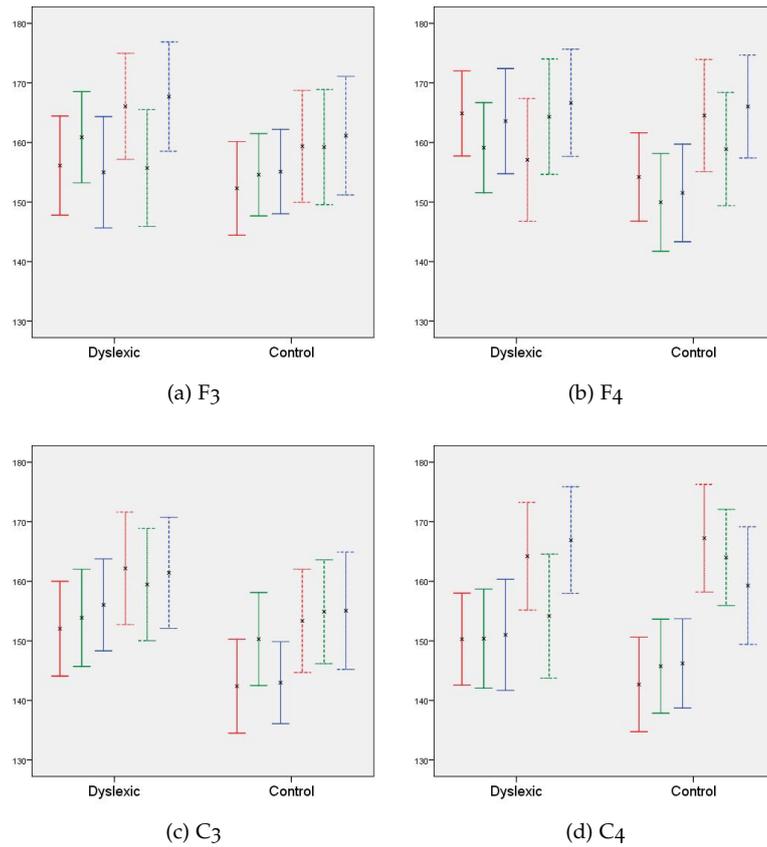


FIG. 11: Latences des pics MMN pour chaque stimuli, pour chaque électrode, pour le groupe contrôle. Ces amplitudes sont représentées au moyen de barres d'erreur avec un intervalle de confiance de 95%. L'ordonnée représente le temps en ms (de 130 ms en bas à 180 ms en haut). 'Non-speech' désigne les stimuli non-verbaux et 'speech' les stimuli verbaux. Abréviations : Fr désigne les stimuli Français, Ge les stimuli Allemands et Fi les stimuli Finlandais/Hongrois.

8.3 CORRÉLATION ENTRE LA MMN ET LES HABILETÉS MÉTAPHONOLOGIQUES

Nous avons voulu vérifier, si les caractéristiques de la MMN, à savoir l'amplitude et la latence de son pic, pouvaient être reliées aux capacités métaphonologiques des dyslexiques, évaluées par les tests évoqués dont les scores figurent en page 112. Des corrélations bivariées entre les valeurs de la MMN que je viens d'évoquer et ces scores (âge, niveau de lecture, composantes issues de l'analyse en composante principale). La table 22 montre le résultat de ces corrélations pour le groupe des dyslexiques, la table 23 pour le groupe des enfants contrôles. Afin d'éviter tout effet plafond ou autre désagrément statistique, les corrélations significatives mais dont la distribution était anormale furent écartées.

Corrélations avec le niveau de lecture

Pour le groupe d'enfants dyslexiques, seule une corrélation fut observée impliquant le niveau de lecture, ceci étant sûrement en partie du au fait que ces enfants ont un score globalement faible en lecture. Pour le groupe contrôle, on peut voir qu'une amélioration du niveau

	Hémisphère Gauche		Hémisphère droit	
	Non-verbal			
	F3	C3	F4	C4
Age			All L*	
Age_lec				
Phon	Fr A**			
Spoon				
	Verbal			
Age			All L*	Fi L*
Age_lec	Fi A**			
Phon	Fi A**	Fi A*		Fi L**
Spoon	Fi A*	Fi A*+All L*		Fi L**

Tab. 22: Corrélations entre l'amplitude (A) et la latence (L) du pic MMN et les scores des sujets dyslexiques aux différentes tâches métaphonologique (Phon et Spoon représentant les composantes issues de l'ACP) ainsi que leur âge et leur niveau de lecture. Les corrélations négatives sont notées en rouge. * : $p < 0.05$ / ** : $p < 0.01$. Fi désigne les stimuli Finlandais-Hongrois, Fr les stimuli Français et All les stimuli Allemands.

	Hémisphère gauche		Hémisphère droit	
	Non-verbal			
	F3	C3	F4	C4
Age	All L*			
Age_lec	Fi A**+All A*	Fi A*+Fi L*	Fi A*+All A*	Fi A*
Phon		Fi L*	Fi A*+All A*	
Spoon	Fi A*			Fi A**
	Verbal			
Age				
Age_lec	All A*+All L*	All L*	All A*	Fr L*+All A*
Phon				
Spoon				All A*

Tab. 23: Corrélations entre l'amplitude (A) et la latence (L) du pic MMN et les scores des sujets contrôles aux différentes tâches métaphonologique (Phon et Spoon représentant les composantes issues de l'ACP) ainsi que leur âge et leur niveau de lecture. Les corrélations négatives sont notées en rouge. * : $p < 0.05$ / ** : $p < 0.01$. Fi désigne les stimuli Finlandais-Hongrois, Fr les stimuli Français et All les stimuli Allemands.

de lecture peut être reliée à des changements d'amplitude et de latence de pics de MMN obtenus avec les stimuli non-natifs :

1. Pour les stimuli non-verbaux, une diminution d'amplitude dans les électrodes frontales pour les sons Allemands et Finlandais-Hongrois ainsi qu'une diminution d'amplitude et de latence en région centrale pour les stimuli Finlandais-Hongrois uniquement.
2. Pour les stimuli verbaux, une diminution d'amplitude et de latence de pic en frontal pour les stimuli Allemands, une augmentation de latence en C₃ pour les stimuli Allemands et une diminution d'amplitude en C₄ pour les stimuli Allemands et Français.

Corrélations avec la conscience phonologique

Pour le groupe d'enfants dyslexiques, de meilleures performances pour les tâches phonologiques furent trouvées comme étant corrélées avec une plus grande amplitude de pic pour les stimuli Français non-verbaux et les stimuli Finlandais-Hongrois verbaux, ainsi qu'une plus grande latence de pic pour les stimuli verbaux Allemands et Finlandais-Hongrois.

Pour le groupe d'enfants contrôles, de meilleures performances furent trouvées comme étant corrélées avec une amplitude et une latence de pic plus faible pour les stimuli non-verbaux Finlandais-Hongrois et verbaux Allemands.

Finalement, dans les deux groupes de sujets, les corrélations ont montré qu'un âge plus important du sujet était corrélé avec une diminution de la latence de pic.

Tout d'abord, il faut souligner le fait qu'aucune autre étude précédente n'a utilisé le même protocole expérimental, de près ou de loin, dans l'étude de la MMN chez les enfants dyslexiques et /ou contrôles. En effet, cette étude diffère de celle de Näätänen et al. [209] et de celle de Winkler et al. [347] dans le sens que nos stimuli ne sont pas des stimuli entre catégories mais appartiennent à la même catégorie, et que nous recherchons les réponses des représentations natives les plus typiques de la catégorie de voyelle considérée. Cette étude diffère également de celle de Aaltonen et al. [2], car ils recherchaient plutôt un effet au sein de la même catégorie, effet basé sur des prototypes individuels. Il est donc difficile d'effectuer une quelconque comparaison directe avec des études précédentes.

9.1 ANALYSES STATISTIQUES SUR L'AMPLITUDE ET LA LATENCE DU PIC MMN

Globalement, ces analyses n'ont montré aucun effet différentiel clair des voyelles verbales non-natives par rapport aux natives, tant pour le groupe d'enfants contrôles que pour le groupe d'enfants dyslexiques. Dès lors, on peut supposer que l'amplitude et/ou la latence du pic de MMN ne sont pas linéairement liées à la distance phonétique translinguistique.

Deuxièmement, pour le groupe contrôle, les résultats ont montré une distinction claire entre MMN obtenue soit avec des stimuli verbaux ou des stimuli non-verbaux, avec une latence de pic plus importante pour les stimuli verbaux ainsi qu'une amplitude plus grande pour le son natif verbal, et ce, en région centrale droite (C4). Même s'il a été montré une dominance de l'hémisphère gauche dans le traitement du langage, par exemple dans une tâche de comparaison entre voyelle et son pure [109], les résultats obtenus ici suggèrent que l'hémisphère droit participerait au traitement phonétique intra-catégoriel.

La majeure partie des différences entre enfants dyslexiques et enfants contrôles furent obtenues sur les latences de pic de MMN. Ces différences furent obtenues seulement pour les stimuli non-verbaux. En d'autres termes, il semble que des latences de pics plus élevées chez les enfants dyslexiques seraient reliées aux traitements des caractéristiques acoustiques des stimuli. En théorie, les sons non-verbaux sont censés donner lieu à un effet de MMN de la même manière que des sons purs. Des résultats obtenus par de nombreuses études portant sur des sons purs ont montré que l'amplitude du pic s'amplifie et que sa latence diminue au fur et à mesure que la différence acoustique entre son pur standard et son pur déviant s'agrandit [23, 208, 213, 253, 321]. Nos résultats ne sont pas en accord avec cette suggestion. La réponse MMN obtenue avec nos stimuli non-verbaux semble suggérer que ces derniers n'agissent pas comme des sons purs et que les différences peuvent être liées à la nature complexe de ces sons. Les latences plus courtes obtenues chez les sujets contrôles semblent être en accord avec

la conceptualisation selon laquelle l'efficacité des processus d'analyse des sons reposent également sur les caractéristiques spectrales de ces sons, sur des échantillons verbaux [146].

9.2 ANALYSE PAR FENÊTRE TEMPORELLE

Par cette analyse, nous avons pu montrer, pour chaque stimuli et pour chaque groupe de sujets, les fenêtres temporelles correspondant aux périodes où la courbe correspondant au son déviant est significativement différente de celle du son standard. Contrairement à la méthode d'analyse précédente, on ne se limite pas ici à un seul point (le pic) mais à l'ensemble de l'intervalle de temps qui contient le phénomène de MMN.

Concentrons nous tout d'abord sur le groupe contrôle. Pour le son natif, donc les stimuli Français, nous avons montré qu'il y avait une différence temporelle entre le stimulus verbal et le stimulus non verbal (la fenêtre est plus précoce pour le stimulus verbal) pour l'hémisphère droit mais pas pour l'hémisphère gauche. Cette précocité de reconnaissance du verbal natif par rapport au verbal non-natif rejoint les résultats de Winkler et al. [347] En effet, ils suggèrent que la détection pré-attentive d'un contraste de voyelle utilise à la fois la phonétique ainsi que que les représentations mémorielles auditives (la structure acoustique du son). Cette détection se ferait donc plus rapidement pour des sons possédant les deux types de composantes. Il est encore une fois relativement surprenant de constater que la détection précoce de stimuli verbaux par rapport à des stimuli non-verbaux se fasse dans l'hémisphère droit. Ceci rejoint notre résultat obtenu en analyse de caractéristiques de pic (voir section précédente).

Si l'on regarde maintenant les stimuli Allemands, on s'aperçoit encore ici qu'une dichotomie apparaît entre stimuli verbaux et non-verbaux. Cette fois-ci les stimuli verbaux produisent une fenêtre plus précoce en région frontale, alors que les stimuli non-verbaux produisent une fenêtre plus précoce en région centrale, bien que cette différence soit moins marquée en central gauche et que les deux fenêtres en central droit soient relativement précoces. Il semblerait donc ici d'une part qu'un léger éloignement phonétique soit détecté en frontal gauche mais pas en région centrale, et d'autre part qu'un éloignement acoustique soit détecté préférentiellement en région centrale, et plus particulièrement dans l'hémisphère droit. Regardons maintenant ce qui se passe au niveau des stimuli Finlandais-Hongrois, toujours dans le groupe contrôle. Pour ces stimuli la fenêtre est plus précoce pour les sons non-verbaux uniquement en F3, alors qu'elle est plus précoce pour les sons verbaux dans les 3 autres électrodes.

Si l'on regarde par électrode chez les enfants contrôles on peut constater que :

- En région frontal gauche (F3), il y a traitement de l'éloignement phonétique, la détection se faisant de plus en plus précoce au niveau des sons verbaux, plus cet éloignement est important. L'éloignement acoustique n'est que peu différencié.
- En région frontale droit (F4), il a y une détection de la différence entre stimulus non-verbal et verbal (fenêtre précoce pour le son verbal). Cette région semble donc détecter les caractères phonétiques du son. Un faible éloignement phonétique fera toujours apparaître

ce phénomène, mais si l'on s'éloigne trop alors il disparaît. Par contre, l'éloignement acoustique fait avancer le moment d'apparition de la fenêtre du son non-verbal, jusqu'à devenir plus précoce que celle du son verbal.

- En région centrale gauche (C3), l'éloignement phonétique va retarder la fenêtre du son, mais l'éloignement acoustique ne va avoir aucune incidence sur la fenêtre temporelle du son non-verbal.
- En région centrale droit (C4), un phénomène relativement similaire de celui en F4 se produit. Pour le son natif, la fenêtre du son verbal arrive de manière plus précoce. Un éloignement phonétique va retarder la fenêtre du son verbal, proportionnellement à l'éloignement. Un faible éloignement acoustique va faire grandement avancer le moment d'apparition de la fenêtre du son non-verbal, mais si l'éloignement est trop important, la fenêtre est retardée.

Il semblerait donc que l'hémisphère gauche, qui traite de la même manière un son natif verbal ou non-verbal, soit sensible à un éloignement phonétique, se traduisant par une plus grande précocité de traitement en frontal et une moindre précocité en région centrale. L'hémisphère gauche n'est par contre que très peu, voire pas du tout, sensible à un éloignement acoustique.

Il semblerait également que l'hémisphère droit, qui différencie très bien les sons natifs verbaux et non-verbaux, va continuer de traiter de manière précoce (on constate une légère augmentation du temps d'apparition) les sons verbaux légèrement éloignés phonétiquement, mais pas les sons très éloignés phonétiquement. Cet hémisphère droit semble également sensible d'une manière particulière aux différences acoustiques. Les sons non-verbaux s'éloignant très peu de manière acoustique, seront traités de manière beaucoup plus précoce. Toutefois, un éloignement acoustique plus important fera reculer cette précocité.

Pour le groupe des enfants dyslexiques, cette analyse a tout d'abord montré une différence de traitement des sons natifs verbaux. A la différence des enfants contrôles, le traitement n'est plus seulement précoce dans l'hémisphère droit mais également dans l'hémisphère gauche. Pour les stimuli allemands, on note une différence avec les enfants contrôles en F3, le son verbal n'étant plus traité de manière précoce chez les dyslexiques. Enfin, pour les stimuli Finlandais-Hongrois, on peut voir également des différences entre enfants dyslexiques et enfants contrôles, différences se situant en frontal : en F3 le son verbal était traité de manière précoce chez les contrôles mais pas chez les dyslexiques et en F4 on peut observer le phénomène inverse.

Il existe donc des différences entre groupe dyslexique et groupe contrôle au niveau du traitement de l'éloignement acoustique et phonétiques des stimuli.

Si l'on regarde de plus près ces effets d'éloignement on peut s'apercevoir que chez les dyslexiques, l'hémisphère gauche est sensible à l'éloignement phonétique (d'une façon différente des contrôles) mais très peu à l'éloignement acoustique (comme pour les enfants contrôles). L'hémisphère droit est par contre sensible à un grand éloignement phonétique (En C4 uniquement chez les dyslexiques et en F4 et chez les contrôles) et très légèrement à un éloignement acoustique (alors qu'il réagissait plus à un faible éloignement acoustique chez les contrôles).

9.3 ANALYSES EN CORRÉLATION

Les corrélations entre performance de langage et les paramètres MMN furent obtenues quasi exclusivement avec les sons non-natifs. De plus, elle révélèrent un pattern inverse entre les deux groupes de sujet. Pour le groupe contrôle, toutes les corrélations sauf une furent négatives, c'est à dire que les sujets les plus performants avaient les latences et les amplitudes de pic les plus faibles. L'effet inverse fut trouvé pour le groupe d'enfants dyslexiques, montrant des corrélations positives (sauf une).

Chez les sujets contrôles, un niveau de lecture plus élevé fut trouvé comme étant corrélé avec une amplitude et une latence plus faible du pic de MMN obtenue avec les stimuli non-natifs (non-verbal Allemand et Finlandais-Hongrois ainsi que verbal Allemand). Il fut également corrélé avec une latence plus faible du pic obtenu grâce au stimuli native, mais à aucune amplitude obtenue avec les sons natifs. De plus, une seule corrélation fut trouvée avec l'âge des sujets, cette dernière étant différente de celles obtenues avec le niveau de langage. On peut donc supposer que chez les sujets normaux, l'expérience de langage, mais pas la maturation naturelle, est corrélée avec une diminution de la réponse cérébrale aux stimuli non-typiques, mais phonétiquement proches des sons natifs. En d'autres mots, cette expérience de langage maternel chez des enfants normaux tend à diminuer leur discrimination de sons provenant d'autres langues, au sein d'une même catégorie phonologique. Les corrélations obtenues avec les composantes des tâches métaphonologiques tendent à confirmer cette suggestion. En effet, de meilleures performances à ces tâches furent trouvées comme étant corrélées avec une amplitude et une latence réduite du pic de MMN obtenu grâce aux stimuli non-natifs (verbal Allemand et non-verbal Finlandais-Hongrois).

Chez les sujets dyslexiques, contrairement au groupe contrôle, les sujets avec un haut niveau de lecture montrèrent une amplitude plus importante du pic obtenu avec les stimuli non-natifs (verbal Finlandais-Hongrois). De même, les sujets avec de meilleures performances aux tâches métaphonologiques eurent une amplitude et une latence de pic plus élevée pour les sons verbaux non-natifs et les sons natifs non-verbaux. En résumé, il semble que l'expérience de langage chez les enfants dyslexiques tende à intensifier la distinction des stimuli non-natifs, de même que les composantes acoustiques des sons. De tels résultats furent déjà obtenus par Goswami, conformément à sa théorie du centre perceptuel [110] qui postule que les dyslexiques échouent dans leur tentative de se repérer dans le langage grâce aux caractéristiques physiques des voyelles.

Pris ensembles, les résultats obtenus chez les enfants contrôles et chez les enfants dyslexiques donnent un soutien important à la théorie du mode de perception allophonique dans la dyslexie [261]. Ces résultats sont étonnamment similaires à ceux obtenus par une autre équipe de notre laboratoire, qui utilisa la technique de la TEP chez des adultes dyslexiques et des lecteurs contrôles [71].

9.4 CONCLUSION

Dans sa revue, Bishop [28] montra que globalement, les études avaient échoué dans leur tentative de montrer un lien clair entre les résultats obtenus dans des expériences de MMN et des habiletés cognitives. On peut remarquer que, dans la présente étude, nous échouons également à trouver un tel lien entre performance métaphonologique et MMN obtenue grâce à des sons natifs bien que nous ayons utilisé des stimuli simples, comme le recommandait Bishop. Toutefois, de tels liens furent trouvés ici avec les stimuli non-natifs, ce type de stimuli n'ayant été utilisé par aucune des études analysées par Bishop.

Finalement, Tallal suggéra que les déficits auditifs chez les dyslexiques seraient dûs aux différences rapides de transition spectrale entre les sons [307]. Or les voyelles n'ont aucune transition spectrale, et l'intervalle inter-stimuli utilisé dans notre expérience était au delà de la limite de temps fixée par Tallal. D'après la théorie développée par cet auteur, nous ne devrions donc observer aucune différence entre enfants dyslexiques et enfants contrôles, ce qui n'est pas le cas. Des études supportent l'hypothèse que les aires corticales de l'hémisphère gauche sont prédominantes pour le décodage des perturbations temporelles rapides des signaux acoustiques, alors que les aires corticales homologues de l'hémisphère droit seraient plus sensibles aux changements dans la bande de fréquence [211]. Les différences trouvées ici entre enfants dyslexiques et enfants contrôles impliquent les deux hémisphères. En effet, les enfants dyslexiques ne montrèrent aucune corrélation dans l'hémisphère droit entre les tâches métaphonologiques et la MMN obtenue avec les stimuli non-verbaux alors que de telles corrélations furent trouvées chez les enfants contrôles ; de façon symétrique, chez les enfants contrôles, aucune corrélation ne fut trouvée dans l'hémisphère gauche entre les tâches métaphonologiques et la MMN obtenue avec les sons verbaux, alors qu'on peut en observer pour les enfants dyslexiques (voir table 22 et 23). On peut alors supposer que, en accord avec la suggestion de Serniclaes [261], les enfants dyslexiques sembleraient souffrir d'un double déficit, tant sur l'analyse des transitions spectrales que sur l'analyse des caractéristiques spectrales, le déficit observé dépendant du type de stimulus présenté à l'enfant. Ce double déficit semble également être confirmé l'analyse de comparaison des courbes correspondant aux sons standards et déviants qui montre également des différences dans les deux hémisphères.

Il a également été montré chez l'adulte dyslexique que la sensibilité aux transitions acoustiques rapides variait suivant les sujets [107]. Les futures études portant sur le sujet, devront se concentrer sur une meilleure caractérisation des anomalies biologiques qui entrent en jeu dans cette hétérogénéité phénotypique.

Le langage est un phénomène cognitif d'une extrême complexité. La dyslexie développementale, trouble du langage écrit, semble provenir d'une particularité génétique qui causerait des différences neuronales structurales, telle que la migration incomplète de certains neurones au cours du développement de l'enfant.

L'impact de ces différences, nous l'avons vu, est multiple, ce qui rend la caractérisation de la dyslexie difficile et a donné naissance à de nombreuses théories. Le déficit phonologique, largement admis, ne semble cependant pas être « à la base » du trouble dyslexique. Des différences perceptuelles de plus bas niveau, telles que révélées dans notre étude sur le déficit auditif pré-attentif existent et commencent à être expliquées par de nouvelles théories ayant de nombreux traits de ressemblance entre elles : déficit d'accès à la mémoire de travail de Ramus et Szenkovits, déficit d'ancrage de Ahissar et perception allophonique de Serniclaes.

Le projet Neurodys, de par sa volonté de rassembler de nombreuses données comportementales, d'imagerie et de génétique chez une population multilingue permettra certainement de donner un nouvel éclairage sur les troubles du langage. Il semble donc nécessaire, à l'avenir, de multiplier les projets de recherche de cet ordre.

La compréhension du trouble est un élément fondamental qui apporte des informations cruciales à la construction de méthodes de rééducation. De plus en plus d'études, dont celle présentée ici, montrent en effet qu'aucune des méthodes actuelles ne se distingue des autres de par son efficacité. La grande hétérogénéité du tableau dyslexique fait qu'il semble de plus en plus crucial de concevoir des méthodes multimodales. Les futures recherches devraient donc se concentrer sur l'étude de l'efficacité de l'association de différentes méthodes de rééducation, comme par exemple dans le projet « Progrès », initié au sein de l'unité INSERM 455 (Voire le rapport de thèse de Mélanie Jucla [138]).

Quatrième partie

APPENDICES

L'IMAGERIE PAR RÉSONANCE MAGNÉTIQUE FONCTIONNELLE

Cette technique est utilisée dans la première des deux études de recherche qui sont présentées au sein de cette thèse. Afin d'aider le lecteur à mieux comprendre les tenants et les aboutissants de ce projet de recherche, je vais faire ici un descriptif de cette technique d'imagerie. Tout d'abord, je vais présenter les principes de base de l'imagerie par résonance magnétique, ce qui aidera à mieux comprendre le fonctionnement de l'imagerie par résonance magnétique "fonctionnelle" que je présenterai ensuite.

A.1 L'IMAGERIE PAR RÉSONANCE MAGNÉTIQUE

L'IRM, inventée au début des années 1970 par Paul Lauterbur de l'Université d'Urbana dans l'Illinois (États-Unis), a été une véritable révolution en biologie et en médecine. L'incomparable précision anatomique des images du cerveau fournies par cette technique, par ailleurs totalement inoffensive pour l'homme a fait qu'en quelques années elle a supplanté en neurosciences deux autres méthodes d'imagerie, pourtant tout juste inventées.

Pour les études neuroanatomiques, l'IRM a tout de suite remplacé le scanner X, en tant que méthode de diagnostic en neurologie et neurochirurgie, mais également pour les études neuroanatomiques chez le témoin volontaire sain. L'IRM dite « pondérée en T_1 » permet en effet d'obtenir des images numériques en trois dimensions d'une précision submillimétrique du cortex, de la substance blanche, du liquide céphalo-rachidien et des noyaux gris centraux. Ce type d'acquisition de données permet d'effectuer une analyse neuroanatomique individuelle de très haute précision.

Pour les études fonctionnelles, l'IRM a remplacé, vers la fin des années 1990, la TEP. L'IRMf, dite « pondérée en T_2 » ou « T_2^* », donne accès à des images fonctionnelles du cerveau humain à la résolution de quelques millimètres et en quelques secondes, et ceci sans injection de produit, là où la TEP ne permet d'obtenir que des images de 8 à 12 mm de précision en 90 secondes et avec, en plus, des injections de produits radioactifs. L'IRMf, qui est en passe de révolutionner les neurosciences humaines, a été inventée dans les années 1990 par l'équipe de Bruce Rosen au *Massachusetts General Hospital* à Boston (États-Unis).

Le terme d'IRM recouvre tout un ensemble de techniques d'imagerie qui, bien que pratiquées sur le même appareil, sont en fait autant d'approches différentes de l'architecture et du fonctionnement d'un organe. Outre des images anatomiques et fonctionnelles, l'IRM permet également d'obtenir des images de l'organisation spatiale des vaisseaux cérébraux (angiographie IRM voir figure 13), de l'orientation des principaux faisceaux de fibres blanches (IRM de diffusion, voir figure 12), de la distribution du sang (IRM de perfusion, voir figure 15) et de la distribution de certains métabolites énergétiques (spectroscopie IRM, voir figure 14).

Je vais tout d'abord présenter les bases physiques communes aux diffé-

rentes méthodes d'IRM, ainsi que les principes qui permettent d'acquérir ces images. Je commencerai d'abord par présenter brièvement une introduction sur les images numériques et leur manipulation, afin de donner une meilleure compréhension de la suite.



FIG. 12: Exemple d'image obtenue par tractographie IRM. Cela permet de visualiser les faisceaux de fibre blanche interconnectant les différentes régions cérébrales.

A.1.1 Introduction aux images numériques

Une image numérique est un tableau, en général carré, dont chaque cellule contient une valeur numérique représentant la distribution dans l'espace d'une certaine quantité physique. L'intérêt de disposer d'une version numérique d'une image est que celle-ci est facilement interchangeable et que, à l'aide de programmes informatiques, on peut les afficher aisément sur un écran, en modifier l'apparence, s'en servir de base pour effectuer des calculs, etc. . . Ces images peuvent donc être facilement affichables en créant une table de correspondance entre les valeurs de chaque cellule de l'image et des couleurs. Dans le jargon de l'imagerie, un tel tableau s'appelle une matrice ; elle peut être à 2, 3, voire 4 dimensions. La taille de la matrice image est définie par son nombre de lignes et de colonnes : par exemple, une image anatomique 3D du cerveau acquise en IRM pondérée en T_1 (voir section suivante) est souvent de taille $256 \times 256 \times 128$, c'est à dire qu'elle constitue un parallélépipède rectangle ayant 256 lignes dans les directions X et Y et 128 lignes dans la direction Z. Chaque cellule d'une image 2D s'appelle un pixel (de l'anglais "picture element") et celle d'une image 3D un voxel (pour "volume element"). Une image 64×64 (2D) est donc formée de 4096 pixels, alors qu'une image $256 \times 256 \times 128$ (3D) est composée de 8388608 voxels.

Il est difficile de présenter sur un écran d'ordinateur, qui est intrinsèquement bidimensionnel, l'image tridimensionnelle d'un objet tel qu'un cerveau. Aussi, les images 3D sont-elles fréquemment consi-



FIG. 13: Exemple d'image par angiographie IRM. Cette technique permet de mettre en relief les vaisseaux sanguins du cerveau.

dérées comme un empilement dans une direction d'images 2D : par exemple, une image $256 \times 256 \times 128$ 3D T_1 du volume cérébral peut être considérée comme une pile dans la direction Z de 128 images 2D ; chacune de ces images s'appelle alors une coupe.

coupe.

Les pixels d'une image (ou les voxels d'un volume) contiennent une valeur numérique qui représente une quantité physique. Dans une image IRM pondérée en T_1 , cette valeur est celle du signal Résonance Magnétique Nucléaire (RMN) en ce point. En fait, un voxel a une taille physique non-nulle, qui est égale au volume total de l'image divisé par le nombre de voxels. Ainsi, chaque voxel d'une image de volume de $24 \times 24 \times 15 \text{ cm}^3$ et de taille $256 \times 256 \times 128$ représente environ $0.937 \times 0.937 \times 1.17 \text{ mm}^3$, soit environ 1 mm^3 . La valeur numérique attribuée au voxel correspond, en fait, à la moyenne du paramètre physique dans le volume du voxel. Ceci est à l'origine d'un phénomène connu sous le nom d'« effet de volume partiel » : lorsque les voxels ont une dimension plus importante (plusieurs millimètres), différents types de tissus peuvent éventuellement contribuer à la valeur d'un voxel. Cet effet de volume partiel crée un flou aux interfaces entre les différents tissus qui rend difficile l'identification précise de leurs limites.

Les images numériques peuvent être manipulées et transformées à

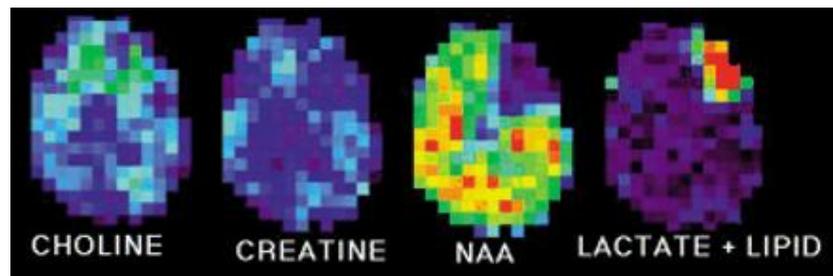


FIG. 14: Exemple d'image par spectroscopie IRM. Chez le même patient, on détecte les concentrations de différents métabolites.

l'aide de programmes informatiques. Le traitement d'image a plusieurs objectifs : améliorer la qualité d'une image, reconnaître des formes (bords, structures particulières) ou détecter un signal. Les différentes manipulations utilisées dans la première étude de cette thèse seront détaillées dans une section ultérieure de cette annexe.

Je vais maintenant aborder les bases du signal [IRM](#)

A.1.2 L'aimantation

L'Hydrogène (H) est un constituant majeur de pratiquement toutes les molécules biologiques. En particulier, les molécules d'eau (H_2O), qui représentent plus de 80% du poids du cerveau, contiennent deux atomes d'hydrogène. Le noyau d'un atome d'hydrogène a une composition très simple puisqu'il est formé d'un unique proton. Lorsqu'on place un sujet dans un champ magnétique B_0 , typiquement orienté des pieds vers la tête, les moments magnétiques des noyaux d'hydrogènes du corps du sujet, appelés les spins ¹, ne peuvent s'orienter que selon la direction de ce champ, soit dans le même sens, soit en sens inverse. Ceux qui sont orientés dans le sens du champ B_0 étant en faible majorité, la somme algébrique de tous les spins individuels des protons du sujet n'est pas nulle. Il apparaît donc un moment magnétique résultant non nul, noté M_0 , orienté dans le sens de B_0 . Ainsi, tout se passe comme si, en plongeant le sujet dans un champ magnétique, on l'avait aimanté (voir figure 16)

A.1.3 La résonance

L'objectif d'une expérience d'[IRM](#) est de mesurer l'aimantation M_0 en chaque point du cerveau. Cependant, comme la valeur de M_0 est extrêmement faible par rapport à celle de B_0 et que ces deux quantités ont la même orientation, il est en pratique impossible de mesurer la valeur de M_0 tant que celle-ci reste alignée avec B_0 . Il est donc nécessaire, bien que l'action de l'axe de B_0 sur M_0 soit très intense, d'en écarter la direction de M_0 . Pour ce faire, on utilise un champ magnétique perpendiculaire au champ B_0 , noté B_1 , qui va exercer un moment de torsion sur M_0 . Compte tenu de l'effet puissant exercé

¹ En physique nucléaire, le spin peut être défini comme la quantité qui exprime le moment cinétique d'un corps, noyau atomique ou particule élémentaire, en rotation rapide sur son axe. Le spin se mesure en terme de moment angulaire, qui est une combinaison des mesures de la masse, de la taille et de la vitesse du système de rotation.

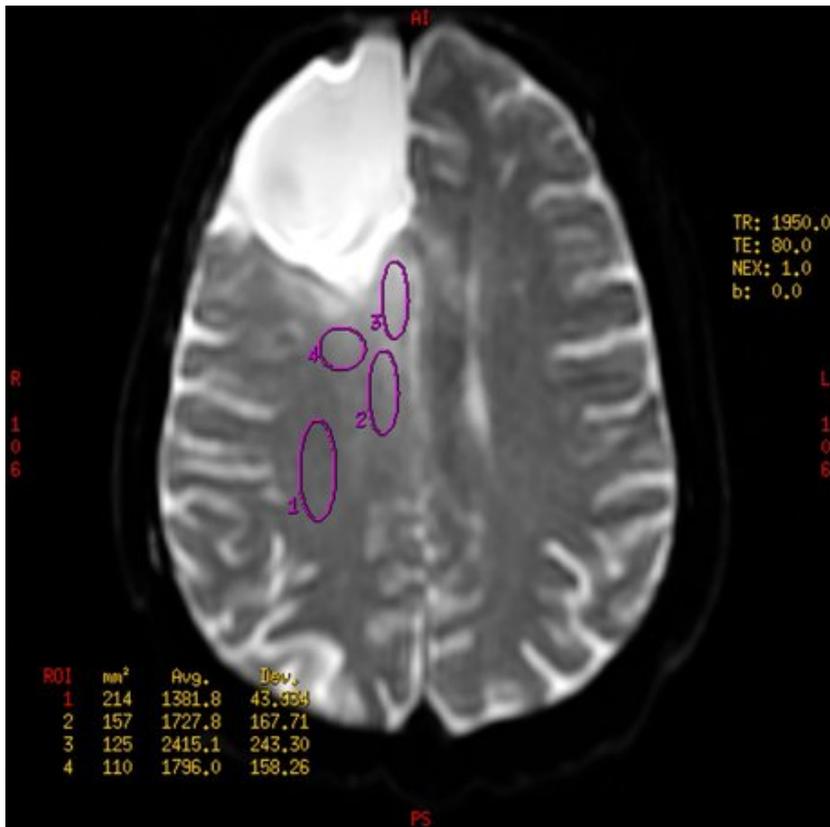


FIG. 15: Exemple d'image IRM de perfusion. Ici, le patient souffre d'un Astrocytome, la perfusion montre un volume sanguin plus important (région blanche) dans la région de la tumeur.

par B_0 sur M_0 , il y a une condition pour que l'effet de B_1 sur M_0 soit efficace qui s'appelle la résonance magnétique. Cette condition est remplie lorsque le champ B_1 tourne exactement à la fréquence propre de rotation des spins des protons (fréquence de Larmor); B_1 peut, en effet, alors agir sur le système de spins et donc sur la direction de M_0 . Le champ magnétique B_1 est créé par une antenne de radio-fréquence (RF) placée autour de la tête du sujet pendant un temps très court (on parle d'impulsion ou "pulse" en anglais) mais suffisant pour écarter M_0 de l'axe B_0 : plus ce temps est long, plus l'angle dont M_0 s'écarte de l'axe B_0 sera important (cet angle de bascule, "flip angle" en anglais, peut varier dans les expériences d'IRM: sa valeur typique est de 90° , ce qui correspond à une bascule de M_0 dans un plan perpendiculaire à B_0).

A.1.4 La relaxation

L'application du champ B_1 fait donc apparaître dans le plan perpendiculaire à B_0 une composante de M_0 , notée M_{xy} (voir figure 17), de valeur non nulle: M_{xy} étant orthogonale à B_0 , son intensité est donc mesurable même en présence de B_0 et, connaissant l'angle de bascule, il devient possible de calculer la valeur de M_0 à partir de celle de M_{xy} .

Cependant, pour mesurer M_{xy} , il est nécessaire de couper le champ B_1 . Dès cette coupure, M_0 se trouve de nouveau sous l'influence de B_0

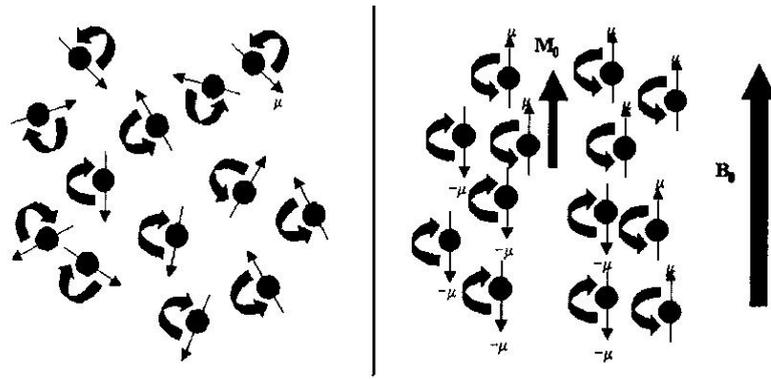


FIG. 16: Moment magnétique résultant d'un ensemble de spins placés dans un champ magnétique stable B_0 . En l'absence de champ magnétique (à gauche), les spins des noyaux d'hydrogène sont orientés aléatoirement : leur résultante est nulle. En présence d'un champ magnétique (à droite), les spins s'alignent sur la direction du champ, majoritairement dans le même sens : il apparaît un moment résultant net, non nul dans le sens du champ.

et va donc progressivement retourner à sa position d'équilibre, ce qui va modifier la valeur de M_{xy} pendant sa mesure. Dans les milieux biologiques, ce retour à leurs valeurs initiales de M_0 et de M_{xy} s'appelle la relaxation : il est sous la dépendance des interactions entre les spins des différents noyaux d'hydrogène.

La relaxation du moment M_0 n'est pas instantanée, mais est un phénomène exponentiel caractérisé par deux constantes temporelles appelées les temps de relaxation : le temps de relaxation dit « longitudinal » ou noté T_1 (appelé aussi temps de relaxation spin-réseau), détermine la vitesse de retour de la composante de M , orientée selon B_0 (M_z , voir la figure 17), à sa valeur initiale. Le temps de relaxation dit « transversal » noté T_2 ou encore T_2^* (appelé aussi le temps de relaxation spin-spin) est, lui, caractéristique de la vitesse de disparition de la composante transverse de M , M_{xy} : M_{xy} est nulle avant l'application de B_1 , apparaît sitôt B_1 appliqué et retourne à sa valeur initiale 0 au cours de la relaxation. Mais la disparition de M_{xy} est en partie sous la dépendance d'un mécanisme différent de celui donnant lieu à la relaxation longitudinale : en un même endroit, les différents protons précessent, en effet, à des fréquences très légèrement différentes et se déphasent donc les uns par rapport aux autres. ceci est dû à la fois aux inhomogénéités du champ B_0 et aux interactions entre les protons et les atomes environnants. Ce phénomène de déphasage a pour conséquence une diminution exponentielle de l'amplitude de M_{xy} avec une constante de temps T_2^* . Derrière l'apparente complexité de ce phénomène il est important de garder en mémoire que dans les milieux biologiques, le cerveau en particulier, le temps de relaxation T_2 ou T_2^* est en règle générale beaucoup plus court que le temps de relaxation T_1 . On ne dispose donc que de peu de temps pour mesurer la composante M_{xy} (exemples de temps de relaxation dans la table 24)

Comme le montre le tableau 24, la valeur des temps de relaxation T_1 et T_2 varie suivant la nature des tissus, du fait de leur composition chimique différente. Ce phénomène est mis à profit en IRM pour obtenir différents types d'images :

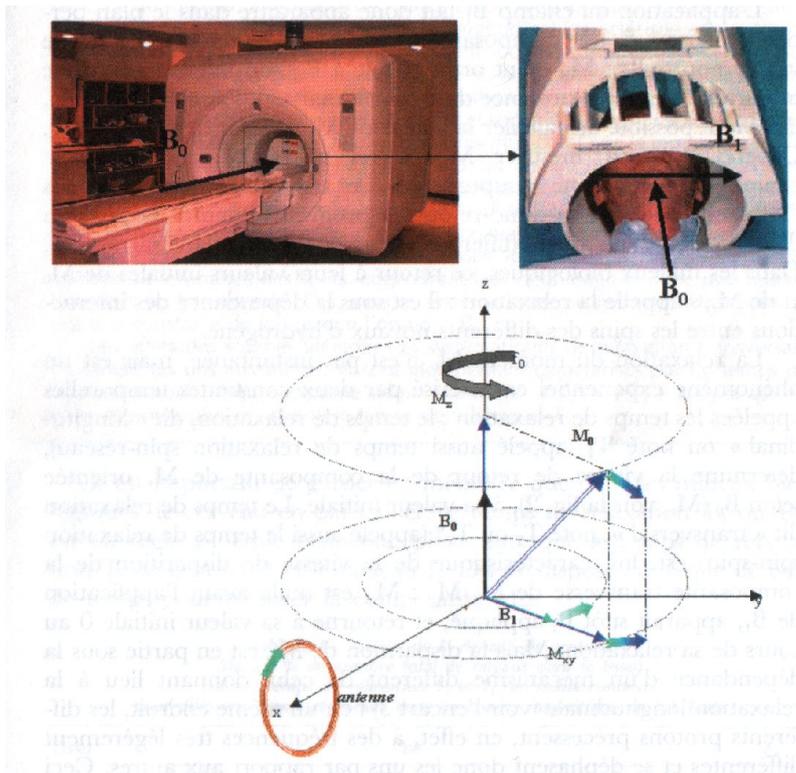


FIG. 17: Aimant de 1.5 Tesla et antenne de radiofréquence utilisés pour l'acquisition d'images de résonance magnétique du cerveau. Noter les orientations relatives des champs B_0 , B_1 , du moment magnétique M_0 et de ses composantes longitudinales M_z et transversale M_{xy} lors du phénomène de résonance magnétique.

1. Celles où la valeur de la composante M_0 est mesurée en chaque point ; on parle d'images en densité de protons puisque la valeur de M_0 en un point dépend essentiellement du nombre de noyaux d'hydrogène.
2. Celles où c'est la valeur d'un temps de relaxation qui est mesuré en chaque point, et on parle alors d'images pondérées en T_1 ou en T_2 .

Le choix du type d'image dépend du type d'information que l'on cherche à visualiser : par exemple, si l'on désire obtenir une image du cerveau montrant clairement la limite entre le cortex et la matière blanche, il est préférable d'utiliser une image pondérée en T_1 , car, comme le montre le tableau 24, c'est pour ce paramètre que le contraste (la différence relative) entre le cortex et la substance blanche est le plus élevé.

Après cet aperçu de la technique **IRM** je vais maintenant me pencher sur son côté fonctionnel.

A.2 L'IMAGERIE PAR RÉSONANCE MAGNÉTIQUE FONCTIONNELLE

Depuis les observations originales de Claude Roy et Charles Sherrington en 1890, il est largement admis que les fonctions supérieures du cerveau ont une traduction hémodynamique au plan local, c'est à dire qu'il existe un couplage régional entre le niveau d'activité électrique,

TISSU	DP	t_1	t_2
Matière grise (cortex)	10.6	1000	100
Matière blanche	10.6	718	80
Liquide céphalo-rachidien	10.8	2060	250
Sang	10	1200	250
eau pure	66.6	4760	3500

TAB. 24: Valeurs de densité de protons (DP, en % du nombre total de noyaux dans le tissu) et des temps de relaxation T_1 et T_2 (en millisecondes) pour différents tissus cérébraux dans un champ magnétique de 1.5 Tesla.

d'une part, et le débit de sang et la consommation d'énergie d'autre part. C'est sur ce postulat qu'ont été développées, dans les années 1970, les méthodes d'imagerie utilisant les traceurs du débit sanguin cérébral marqués avec des émetteurs de photons comme le Xenon 133, puis, dans les années 1980, celles utilisant les émetteurs de positons comme la TEP à l'eau marquée à l'oxygène-15. La mise au point de cette dernière méthode a été à l'origine du développement de la cartographie des fonctions cognitives chez l'Homme sain ou malade et reste utilisée par plusieurs dizaines d'équipes de chercheurs dans le monde.

Les années 1990, cependant, ont été marquées par l'avènement d'une nouvelle technique d'imagerie hémodynamique de la cognition, l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle, qui est devenue en quelques années la méthode majeure d'investigation dans ce domaine de recherche. Les raisons pour lesquelles l'IRMf a rapidement supplanté le TEP sont multiples, mais la principale reste l'opportunité de cartographier l'activité mentale sans injection de produit radioactif. La publication princeps en IRMf, dans la revue américaine *Science* en 1991 par John Belliveau et ses collaborateurs du *Massachusetts General Hospital* à Boston (Etats-Unis), concernait d'ailleurs une étude du système visuel à l'aide de l'IRM et d'un traceur non radioactif, le gadolinium, injecté au sujet. Ce n'est que l'année suivante que Ken Kwong et la même équipe publièrent dans la revue *Proceedings of the National Academy of Science* la première étude d'IRMf dans sa version actuelle, c'est à dire sans aucune injection de traceur, mais basée sur l'observation en temps réel des variations d'oxygénation sanguine locale (méthode connue sous le nom de « BOLD » pour *Blood Oxygen Level Dependant* en Anglais).

Je présenterai ici d'abord les bases neurophysiologiques du signal d'IRMf, puis les principes de formation et les caractéristiques des images obtenues par cette technique. J'exposerai ensuite un aperçu de la construction des protocoles expérimentaux en IRMf, avant d'aborder les principes de l'analyse des images.

A.2.1 Les bases neurophysiologiques du signal en IRMf

Le schéma théorique actuel des événements neurophysiologiques qui sont à l'origine des signaux d'IRMf lors de l'exécution d'une tâche cognitive est le suivant (voir figure 18). Des augmentations locales d'activité synaptique génèrent, dans un premier temps et très localement,

des augmentations de consommation d'oxygène. A ce stade précoce, la concentration veineuse locale en désoxy-hémoglobine (désoxy-Hb) s'élève; ce phénomène, connu sous le nom anglais d'*initial dip*, a été observé par quelques équipes en IRMf et confirme des données obtenues par l'imagerie optique.

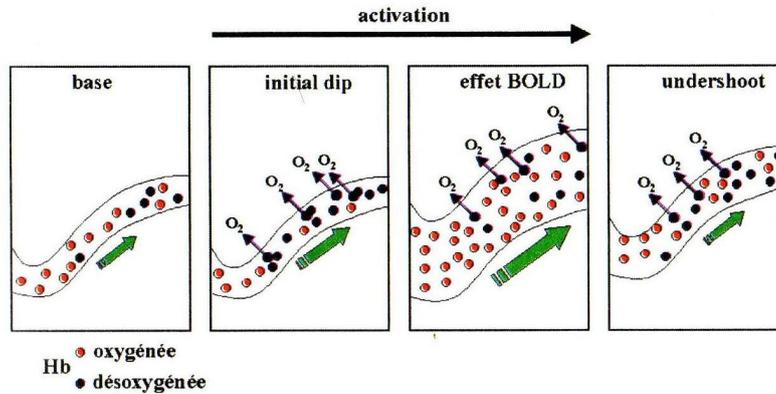


FIG. 18: Les différentes phases de la réponse vasculaire lors d'une activation cérébrale. Séquence temporelle schématique des différents phénomènes vasculaires et métaboliques contribuant aux variations de signal en imagerie par résonance magnétique fonctionnelle. Au temps précoce (1 à 2 s), on observe une augmentation de la consommation d'oxygène, en rapport avec l'activité neuronale, qui génère une augmentation transitoire de la concentration en désoxy-hémoglobine (cercles bleus, *initial dip*). Puis le débit augmente de façon beaucoup plus intense (flèche verte), ce qui entraîne un afflux de globules rouges oxygénés (cercles rouges) et abaisse, par conséquent, la concentration relative en désoxy-hémoglobine : il s'agit de l'effet BOLD (*Blood Oxygenation Level Dependant*). A l'arrêt de l'activation, le signal décroît en deçà de sa valeur de base car il persisterait temporairement une vasodilatation et une surconsommation d'oxygène sans augmentation de débit.

L'augmentation de débit (et de volume) sanguin cérébral régional qui apparaît ensuite enrichit le réseau capillaire en sang artériel riche en oxygène d'une façon qui dépasse largement les besoins en oxygène, à la fois en amplitude et en étendue spatiale. Cette inadéquation entre offre et demande en oxygène engendre une diminution relative de la concentration veineuse en désoxy-Hb : c'est ce signal qui constitue la réponse BOLD. Autrement dit, l'activité synaptique qui consomme de l'oxygène a pour traduction une augmentation (et non une diminution) de l'oxygénation sanguine. Ce phénomène de « découplage » entre la réponse hémodynamique et la consommation d'oxygène locale explique en partie les résultats obtenus par Marcus Raichle et son équipe aux Etats-Unis au milieu des années 1980 avec le TEP. Ces résultats montraient que, lors d'une stimulation visuelle, l'augmentation de débit sanguin cérébral mesurée en TEP était au moins 10 fois plus importante que l'augmentation de la consommation locale d'oxygène engendrée par la stimulation.

Un élément fondamental pour l'interprétation des signaux d'activation observés en IRMf est la dynamique temporelle des phénomènes vasculaires. Ceux-ci sont, en effet, la conséquence d'une augmentation locale du débit sanguin, due principalement à une vasodilatation des

petites artères irriguant la région, qui engendre une élévation de la vitesse de circulation du sang dans les capillaires. Par rapport à l'activité synaptique qui en est à l'origine, cette augmentation de débit n'est pas immédiate mais, en raison des résistances mécaniques des parois vasculaires, peut prendre plusieurs centaines de millisecondes avant d'être détectable. Par ailleurs, l'augmentation de débit n'atteint pas immédiatement sa valeur maximale mais subit une variation progressive qui l'amène à une valeur plateau plusieurs secondes après le début de l'activité mentale et à la condition que celle-ci reste soutenue (voir figure 19). A l'arrêt de l'activation se produit un phénomène connu

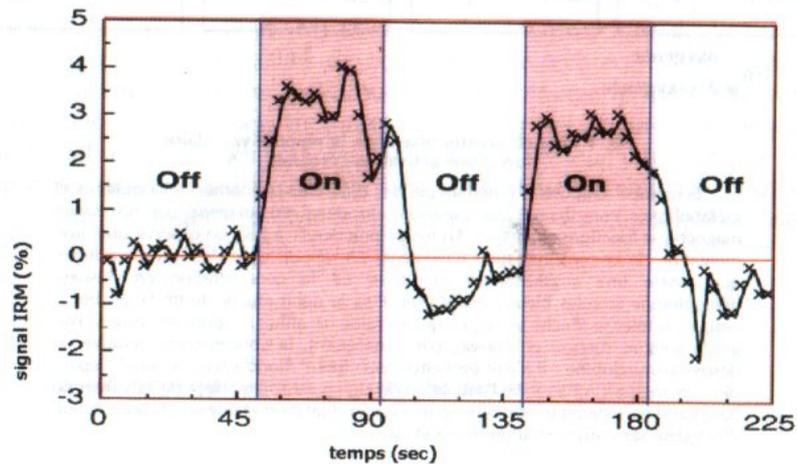


FIG. 19: Illustration du déroulement temporel de la réponse hémodynamique mesurée en IRMf dans le cortex visuel primaire. Dans cette expérience, on alterne des périodes de 45 seconde de présence (On) ou d'absence (Off) d'un stimulus visuel. La courbe montre la variation du signal IRMf au cours du temps dans le cortex visuel primaire (chaque croix représente l'acquisition d'une image de trois secondes).

sous le nom anglais d'*undershoot* et qui consiste en une augmentation de la concentration en désoxy-Hb avant son retour à sa valeur de base. Deux explications possibles ont été proposées : soit un phénomène de découplage identique à celui de l'*initial dip*, à savoir un retour plus rapide à la normale du débit par rapport à la consommation d'oxygène (augmentation relative de la désoxy-Hb), soit une persistance de la vasodilatation au-delà de l'augmentation de perfusion et de consommation d'oxygène (peut-être par le biais des veines de drainage), créant un effet BOLD par augmentation du volume sanguin cérébral partiel. Cet effet d'*undershoot* n'est pas systématiquement observé par toutes les équipes et pour tous les types de tâches. Sa durée, lorsqu'il existe, peut aller jusqu'à plusieurs dizaines de secondes.

Trois types de signaux hémodynamiques sont donc potentiellement observables : le débit sanguin, le volume sanguin et la concentration en désoxy-Hb. L'IRMf permet d'obtenir des images de ces signaux à l'aide de traceurs non-radioactifs mais possédant une propriété physique particulière, le paramagnétisme, qui les rend détectables de façon externe. Certains de ces traceurs sont exogènes, tel que le Gadolinium qui, une fois introduit par voie intraveineuse, reste dans le compartiment intravasculaire et permet donc de visualiser les variations de volume sanguin local. Cette technique, la première utilisée par l'équipe

Le paramagnétisme désigne en magnétisme le comportement d'un milieu matériel qui ne possède pas d'aimantation spontanée mais qui, sous l'effet d'un champ magnétique extérieur, acquiert une aimantation dirigée dans le même sens que ce champ d'excitation.

de Boston en 1991, comme indiqué plus haut, a rapidement cédé le pas à l'imagerie **BOLD**, en raison de limites intrinsèques à l'utilisation du Gadolinium chez l'Homme, à savoir sa rémanence dans le système vasculaire et sa toxicité.

Le traceur le plus utilisé en **IRMf** est, depuis plusieurs années, la désoxy-Hb, traceur endogène dont la concentration varie avec de nombreux paramètres locaux : le débit et le volume sanguins, la consommation d'oxygène et l'hématocrite. Le fait que cette technique utilise un traceur endogène constitue un avantage considérable à deux titres. D'une part, les variations de sa concentration peuvent être suivies en continu et en temps réel ; la résolution temporelle de la technique ne dépend dès lors que de la résolution physiologique de phénomènes observés et non du principe physique à la base de la formation de l'image (élimination du traceur par décroissance radioactive ou par voies naturelles). D'autre part, la technique devient totalement inoffensive pour le sujet, puisqu'elle ne comporte ni injection ni exposition à des substances toxiques ou ionisantes. En revanche, il est essentiel de bien retenir que le traceur de l'**IRMf-BOLD** est un traceur intravasculaire, et plus précisément du compartiment veineux puisque le sang artériel est habituellement saturé en oxygène. Autrement dit, le signal **BOLD** provient des vaisseaux veineux et non des tissus cérébraux.

A.2.2 La résolution temporelle de l'IRMf

La durée d'acquisition d'un volume image, autrement dit le parcours d'une fois le cerveau (qu'on appelle un temps de répétition noté TR) dépend, en effet, du nombre de plans à acquérir et de la taille de la matrice image pour chaque plan. Sur un aimant clinique de 1.5 Tesla, une image **BOLD** de taille 64x64 pixels couvrant un champ de vue de 22x22cm³ peut-être acquise en 166 ms. Autrement dit, il est possible de suivre les variations de concentration de désoxy-Hb toutes les 166 ms si l'on se restreint à l'étude d'un plan unique. Si l'on veut observer ces variations dans plusieurs plans simultanément, cette résolution temporelle se dégrade d'un facteur égal au nombre de plans. Ainsi, il faut environ 6 secondes pour obtenir une série de 36 plans jointifs couvrant l'ensemble de l'encéphale.

Cette résolution temporelle « image » conditionne évidemment le protocole expérimental. elle doit être différenciée de la résolution temporelle « physiologique » qui correspond à la vitesse d'apparition du signal **BOLD**. Les travaux menés en imagerie optique montrent que ce temps de réponse hémodynamique est de l'ordre de 1 à 3 secondes, ce qui conditionne à la fois le protocole expérimental et l'analyse des données. Par ailleurs, par le même effet d'inertie mécanique des parois vasculaires, la réponse hémodynamique perdure pendant un certain temps (de l'ordre d'une dizaine de secondes) après sa mise en route. au total, c'est bien la forme de la réponse hémodynamique qui détermine la résolution temporelle en **IRMf**.

A.2.3 La résolution spatiale de l'IRMf

La résolution spatiale de l'**IRMf** est fixée au moment de l'acquisition des images. Elle correspond, d'une part, à l'épaisseur de coupe et, d'autre part, à la taille du champ de vue dans la coupe divisée par la taille de la matrice image. Par exemple, un champ de vue carré

de 22 cm de côté, acquis sous la forme d'une matrice de 60 lignes et 64 colonnes, donne une résolution rapide de 3.43 mm (22/64). des résolutions spatiales très fines (< 1 mm) peuvent être obtenues, en particulier en imagerie monocoupe. En imagerie multicoupe, pour éviter des durées d'acquisition trop longues, on choisit en règle générale une résolution de l'ordre de 3 à 4 mm, identique de préférence dans les trois directions de l'espace.

A.2.4 *L'amplitude des signaux d'activation en IRMf*

L'amplitude des signaux d'activation, en IRMf — c'est à dire des variations de désoxy-Hb — est relativement faible (de l'ordre de quelque pour-cent, parfois moins de 1%) quand on la compare aux signaux de débit sanguin cérébral correspondants tels qu'on peut les mesurer en TEP (rapport de 1 à 10 approximativement). Ceci pourrait paraître constituer une limite fondamentale à la sensibilité de l'IRMf, mais cette relative modestie de l'amplitude des signaux se trouve plus que compensée par la possibilité de répéter de très nombreuses fois la prise de mesure chez le même sujet et donc d'obtenir au total une puissance statistique supérieure. Ainsi, 12 mesures en TEP représentent une durée d'acquisition de 18 minutes ; dans ce même laps de temps, 180 mesures peuvent être obtenues en IRMf, soit 15 fois plus.

A.3 LA MISE EN OEUVRE D'UN PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL EN IRMf

A.3.1 *Les protocoles expérimentaux*

Compte tenu du fait qu'une mesure peut-être réalisée toutes les 6 secondes (souvent moins) et répétée sans attendre, il est possible d'utiliser des stimuli relativement brefs, nombreux et variés.

Il existe essentiellement deux types de protocole expérimental en IRMf :

- La majorité des expériences en IRM fonctionnelle est réalisée selon des protocoles (« paradigmes ») inspirés de ceux utilisés en tomographie par émission de positons. Dans ces protocoles de type "block" différentes conditions expérimentales, typiquement deux, sont alternées (Figure 4). Les différences entre conditions peuvent résider dans les stimuli présentés et/ou dans les tâches assignées aux sujet. La durée d'application des deux conditions est généralement la même (de l'ordre de la minute) et l'alternance entre conditions est répétée un certain nombre de fois. Cette alternance permet de s'affranchir, lors du traitement des données, des effets artefactuels liés à des dérives lentes de la ligne de base des signaux mesurés.

Des protocoles de ce type ont été appliqués dans d'innombrables études IRMf sur les systèmes moteurs et sensoriels ou sur certains aspects du traitement cognitif. Bien que la résolution temporelle des mesures successives du volume cérébral soit de l'ordre de la seconde, celle des mesures associées à des conditions expérimentales différentes n'est donc que de l'ordre de plusieurs dizaines de secondes. À titre d'illustration, la Figure 5 montre les stimuli visuels utilisés pour détecter les aires visuelles (V5/MT) au sein desquelles les propriétés des mouvements des stimuli sont traitées (il s'agit d'anneaux concentriques centrés autour du point de fixation et qui sont immobiles dans la condition basale et en expansion

continue pendant la condition d'activation), ainsi que les réponses différentielles obtenues spécifiquement dans ces aires.

Dans les protocoles de type block, des événements d'un même type (des stimuli et/ou des actions du sujet) se succèdent typiquement toutes les 2 à 3 secondes au sein de chacune des conditions du paradigme. Les activations détectées in fine reflètent des différences statistiquement significatives entre les réponses moyennes mesurées pendant chacune des conditions du paradigme. Avec ces paradigmes, il n'est pas possible d'identifier les réponses associées à des événements individuels ayant eu lieu à un moment particulier de l'exploration.

- Des développements plus récents ont rendu possible la mesure des réponses à des événements individuels et ont ainsi fortement élargi l'éventail des protocoles expérimentaux en IRM fonctionnelle. Le principe de la nouvelle approche « l'IRMf événementielle » consiste à identifier la réponse cérébrovasculaire locale à des événements individuels brefs, espacés dans le temps (Figure 6).

La réponse cérébro-vasculaire à ces événements brefs présente une variabilité relativement importante, tant entre différentes régions au sein d'un même cerveau, que pour une région déterminée examinée chez différents sujets. Cette variabilité de la réponse cérébrovasculaire constitue l'une des difficultés en IRMf événementielle.

Dans certaines conditions expérimentales, la réponse hémodynamique semble se comporter approximativement linéairement. L'hypothèse de la linéarité de la réponse hémodynamique est dès lors souvent avancée. L'intérêt de cette hypothèse est qu'elle permet de prédire des réponses théoriques sur la base d'une simple convolution entre le paradigme (considéré comme une suite d'événements impulsionnels) et la réponse impulsionnelle du système. Dans la plupart des paradigmes en IRMf événementielle, les événements successifs (engendrant les réponses cérébro-vasculaires) sont espacés dans le temps par des intervalles constants. L'espacement optimal entre événements est alors de l'ordre d'une quinzaine de secondes. Dans ces conditions, on évite la superposition des réponses cérébro-vasculaires aux événements successifs. Le temps d'un examen IRMf étant forcément limité, il en résulte un nombre réduit de mesures. Pour un temps d'examen de vingt minutes, par exemple, les réponses cérébro-vasculaires à quelques quatre-vingt événements seulement pourront être enregistrés. Il en résultera un rapport signal-sur-bruit relativement réduit. Par ailleurs, des protocoles expérimentaux dans lesquels les stimuli sont présentés à intervalles réguliers présentent également des inconvénients au niveau purement comportemental, les sujets pouvant anticiper le déroulement des événements. Les intervalles inter-stimuli longs et réguliers tendent par ailleurs à induire une activité cognitive non-contrôlée chez les sujets lors de ces intervalles.

On peut montrer que, en utilisant des intervalles inter-stimuli de durée pseudo-aléatoire, la variance du signal augmente de façon monotone avec la décroissance de l'intervalle moyen (dans l'hypothèse du comportement linéaire de la réponse cérébro-vasculaire). Le nombre d'événements par unité de temps peut alors être augmenté significativement par rapport aux paradigmes à intervalles inter-stimuli constants, engendrant des résultats présentant une

plus forte puissance statistique. Au niveau comportemental, par ailleurs, les paradigmes événementiels à intervalles inter-événements de durée pseudo-aléatoire requièrent plus fortement l'attention des sujets. Ainsi, il apparaît que les paradigmes d'IRMf événementielle à intervalles inter-événements de durée pseudo-aléatoire présentent un double avantage par rapport aux paradigmes événementiels à intervalles constants.

Différents types d'événements peuvent être entrelacés dans les protocoles d'IRMf événementielle. Ainsi, ces protocoles permettent d'isoler les réponses fonctionnelles suivant une sélection post hoc des événements, sur la base des réponses fournies par les sujets lors de l'exécution d'une tâche cognitive particulière (par exemple selon que les réponses étaient vraies ou fausses, ou selon qu'un item a été ou non reconnu dans une suite d'items présentés visuellement). Finalement, la possibilité de présenter rapidement les stimuli, à intervalles inter-stimuli irréguliers, permet de concevoir des paradigmes très proches de ceux utilisés généralement dans les études comportementales ou en électrophysiologie (potentiels évoqués).

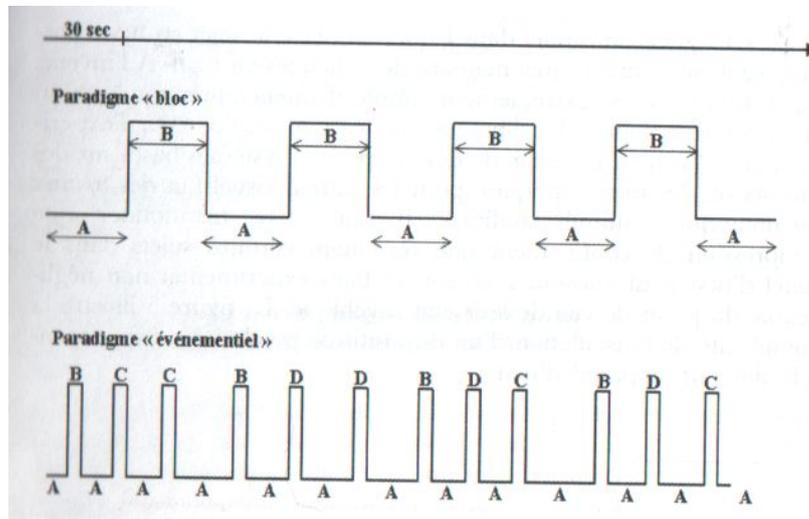


FIG. 20: Exemples de protocoles expérimentaux de type « bloc » et de type « événementiel ». Il s'agit de la séquence temporelle de présentation des stimuli (A, B, C, D) dans les deux cas.

A.3.2 Les contraintes expérimentales

La mise en oeuvre d'un protocole expérimental en IRMf pose un certain nombre de problèmes liés :

1. A la nécessité de travailler en présence d'un fort champ magnétique.
2. Au confinement du sujet dans l'imageur IRM.
3. Au bruit important généré par les bobines de gradients pendant l'acquisition des images.

La présence d'un fort champ magnétique impose en premier lieu des règles de sécurité très stricte en ce qui concerne le recrutement des

sujets participant aux études (Aucun pacemaker, appareil dentaire métallique, etc. . .).

L'exigüité du tunnel dans lequel est placé le sujet en IRM constitue également une source majeure de difficulté. L'expérimentation nécessite de développer des systèmes basés sur des miroirs ou des fibres optiques pour des stimuli visuels et des tuyaux pneumatiques pour des stimuli auditifs. L'impression de confinement ressentie par certains sujets peut constituer en soi un biais expérimental non négligeable.

Enfin, les séquences d'imageries sont des techniques particulièrement bruyantes (plus de 90 dB). Ce bruit d'origine mécanique constitue une interférence relativement importante dans le protocole expérimental, que les systèmes de casques ou de bouchons auditifs ne peuvent que partiellement atténuer, et dont il faut tenir compte lors de l'interprétation de certaines données.

A.3.3 *Les acquisitions d'images anatomiques complémentaires aux images fonctionnelles*

La plupart des équipes de recherche réalisent, pour chaque sujet participant à un protocole, l'acquisition d'un ensemble d'images anatomiques destinées à faciliter le traitement des images fonctionnelles. En général, on acquiert une image anatomique à haute résolution pondérée en T_1 .

Ces images serviront au recalage des images fonctionnelles, ceci servant à la fois pour la localisation précise des aires activées (dans le cas d'une analyse individuelle) et pour la normalisation spatiale sur un modèle de référence (dans le cas d'une analyse de groupe).

A.4 L'ANALYSE DES DONNÉES EN IRMF

Comme pour les autres méthodes de neuroimagerie cognitive, l'analyse des données en IRMf vise à répondre aux deux questions majeures de l'existence et de la localisation d'aires cérébrales qui ont modifié leur concentration en désoxy-Hb. Il existe de très nombreuses méthodes d'analyse en IRMf, et il ne cesse d'en apparaître, sans qu'il existe réellement une méthode standardisée. Je vais donc présenter, de façon générale, les étapes principales et indispensables de toute analyse des données en IRMf.

A.4.1 *Pré-traitements*

Cette étape a pour but d'améliorer la qualité des images brutes acquises. Elle se divise en plusieurs sous-étapes de correction que je vais détailler. Toutefois, il n'existe pas de convention sur la procédure des pré-traitements. Le choix et l'ordre des étapes à effectuer sont à la discrétion de l'utilisateur et dépendent du type de protocole et d'analyses qu'il veut réaliser. Je vais cependant décrire les étapes considérées comme classiques et que j'ai utilisé pour mes propres analyses.

CORRECTION DE MOUVEMENTS Au cours de l'acquisition des images, le patient est censé rester immobile dans le scanner. Toutefois, il est impossible d'éviter que la tête du sujet bouge quelque peu. Il est donc nécessaire, de « réaligner » les images entre elles. Le logiciel SPM réalise cette opération en prenant une image d'une série

comme référence et en alignant toutes les autres sur cette image grâce à la méthode des moindres carrés et à une transformation spatiale à 6 paramètres [90].

COREGISTRATION Cette étape ressemble quelque peu à la précédente, mais cette fois il s'agit de recalibrer les images fonctionnelles sur l'image anatomique acquise. Ainsi, toutes les images du sujet seront « superposables ». Le logiciel SPM utilise pour cette étape la méthode par interpolation décrite par Collignon et al. [60].

LISSAGE Comme je l'ai décrit précédemment, une image obtenue en IRMf est composée de voxels. Ceci crée un effet de crénelage qui va inclure du bruit au sein de l'image. On va donc lisser les images fonctionnelles au moyen d'un noyau Gaussien, ce qui aura pour effet d'atténuer le bruit et qui aura pour effet par la suite de la suppression des différences fonctionnelles et anatomiques résiduelles lors du moyennage inter-sujets.

A.4.2 Normalisation

Une fois les pré-traitements effectués sur les images obtenues pour un sujet, celles-ci sont prêtes à être analysées. Toutefois, il est généralement indispensable de réaliser des études de groupe. Or, les différences inter-individuelles anatomiques sont telles qu'elles rendent un quelconque moyennage inutile. Il est donc nécessaire de normaliser les images de tous les sujets dans un espace référence commun. Cet espace de référence, dans SPM est choisit parmi des images (appelées « Template ») qui ont été créées conformément à l'espace défini par l'ICBM (International Consortium for Brain Mapping) dans le projet NIH P-20, et qui approximent l'espace décrit par l'atlas de Talairach et Tournoux [306]. De manière simplifiée, les algorithmes utilisés par SPM pour cette étape utilisent la méthode des moindres carrés afin d'obtenir une transformation linéaire entre les images d'un sujet et le modèle.

A.4.3 Analyses statistiques

Ces analyses sont fondées sur une modélisation mathématique de la réponse hémodynamique attendue, qui dépend du paradigme employé. Le type de modèle le plus couramment utilisé est le modèle linéaire généralisé (GLM). Ce modèle va servir à détecter voxel par voxel ceux dont la variation de signal dans le temps est liée à la séquence des différentes tâches d'activation. Les pixels considérés comme statistiquement significatifs peuvent ensuite être représentés en superposition sur une imagerie morphologique haute résolution afin d'être mieux localisés. Généralement, deux étapes sont réalisées :

1. Analyses de premier niveau. Dans cette étape on réalise une analyse statistique sujet par sujet. Dans SPM, on donne au logiciel les images d'un sujet pour un ou plusieurs paradigmes en spécifiant les caractéristiques de ce paradigme, on choisit un modèle de réponse hémodynamique (en général on prendra le modèle HRF ou « Hemodynamic Response Function » en anglais) et le logiciel calcule ensuite les pixels qui sont statistiquement significatifs suivant un seuil p spécifié par l'utilisateur. Il est également possible de filtrer ces résultats en raison du problème des comparaisons

multiples. Toutefois, je ne rentrerai pas dans les détails de cette étape, n'ayant utilisé aucun filtre moi-même.

2. Analyses de second niveau. Ici on va étudier les résultats sur un groupe de sujets, au moyen d'analyses statistiques diverses et variées : t-tests, ANOVAs, analyse multifactorielle, régressions, etc. . .

LES POTENTIELS ÉVOQUÉS

Je vais proposer ici une description générale de la technique des potentiels évoqués. Ainsi, dans l'étude utilisant cette technique, je ne décrirai que les critères spécifiquement utilisés, que ce soit pour l'enregistrement, le filtrage, l'obtention des potentiels évoqués ou encore les traitements statistiques.

Dans le cerveau, les neurones induisent une activité électrique spontanée permanente. Cette activité électrique intracérébrale entraîne des variations de différences de potentiel à la surface du scalp. L'enregistrement de ces fluctuations entre deux points du scalp d'un sujet humain constitue l'ElectroEncéphaloGraphie (EEG). Le déclenchement et le déroulement des traitements cognitifs sont à l'origine de modifications simultanées de l'activité électrique intracérébrale de base. Ces modifications d'activité électrique entraînent des variations d'amplitude et de répartition topographique des potentiels électriques à la surface du scalp. Les Potentiels Évoqués (PE) sont les signaux électriques, synchronisés avec la réalisation d'un processus mental, enregistrés en surface du scalp. L'enregistrement puis l'analyse de ces PE nous informe sur les variations d'activité électrique cérébrale induites par une tâche particulière. Après avoir décrit les techniques utilisées pour enregistrer le signal électrique, je décrirai les traitements et les analyses statistiques réalisés sur l'EEG pour obtenir les PE et les interpréter.

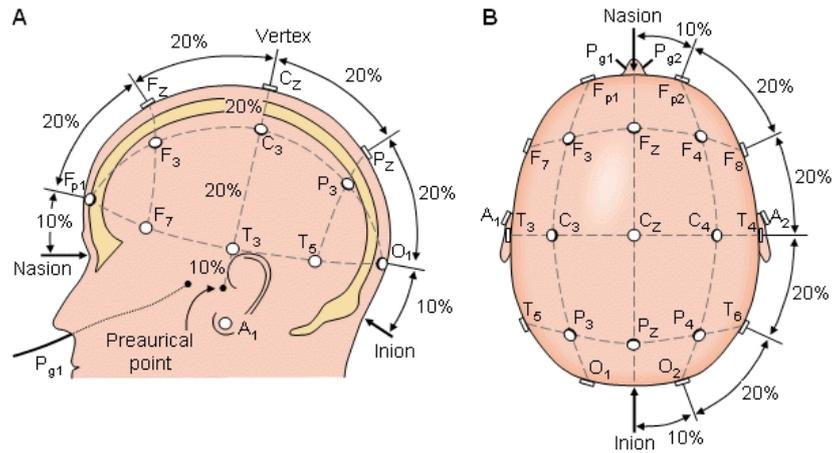
B.1 ENREGISTREMENT DES DIFFÉRENCES DE POTENTIEL

L'enregistrement des potentiels en surface se fait au moyen d'électrodes (voies d'enregistrement) placées sur le scalp, reliées à des amplificateurs. Chaque amplificateur enregistre la différence de potentiel entre une électrode donnée et l'électrode définie comme référentielle. Cette différence de potentiel est enregistrée en continu grâce à un ordinateur.

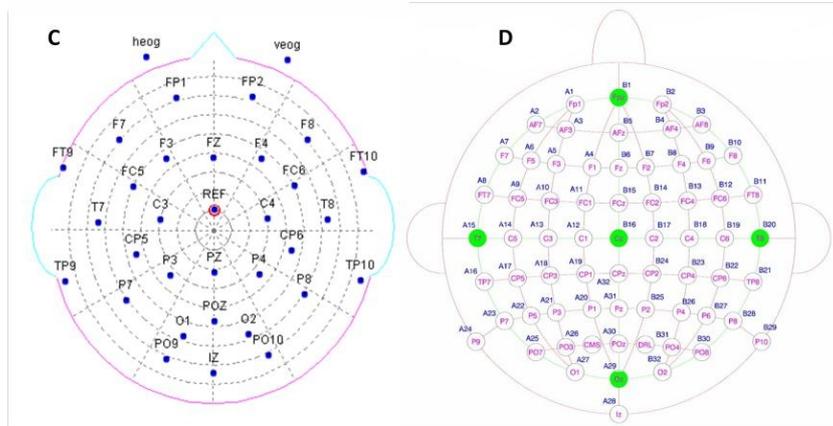
B.1.1 *Les électrodes*

Un certain nombre d'électrodes sont mises en contact avec le scalp. Ce contact est facilité par l'application d'un gel conducteur à haute teneur en sel alcalin (pour des électrodes métalliques) ou avec de l'eau si les électrodes sont reliées à de petites éponges). Quel que soit le matériel utilisé, les électrodes sont réparties sur un bonnet ou un filet de façon standardisée, selon le modèle « 10-20 international » : 19 électrodes sont placées à des distances fixes de certains repères osseux (nasion, inion et les repères préauriculaires droit et gauche) (Figure 21 A et B), puis les autres électrodes sont interposées entre celles-ci jusqu'à atteindre un total de 32, 64, 128 ou même 256 électrodes selon les équipements (Figure 21 C et D pour le matériel utilisé dans nos expériences).

Lorsque toutes les électrodes sont posées sur le scalp du sujet, leurs impédances sont contrôlées, et l'expérience est réalisée en général si toutes les valeurs d'impédances sont homogènes et inférieures à 20 k Ω . Deux électrodes supra- et infra-orbitales peuvent être ajoutées : elles



(a) Modèle 10-20 international



(b) Modèle utilisé

FIG. 21: En haut, répartition des 19 électrodes standards selon le système « 10-20 international » en vue latérale (A) et du dessus (B). En bas, répartition des électrodes (vues du dessus) sur un bonnet à 32 voies (C) et à 64 voies d’enregistrement (D) pour le matériel utilisé dans les expériences présentées dans les chapitres suivants.

permettent d’enregistrer les clignements oculaires du sujet tout au long de l’expérience, pour réaliser — au cours des traitements préliminaires du signal — une correction des artefacts oculaires.

B.1.2 La référence

Un potentiel ne se mesure pas de manière directe, mais forcément par une différence de potentiel entre un point donné et un point de référence. L’électrode de référence idéale aurait la valeur de potentiel du scalp, et serait insensible aux générateurs de courant intracérébraux. Cette référence idéale n’existe pas. Les solutions adoptées peuvent être de placer l’électrode de référence sur le nez, sur le lobe d’une oreille au niveau des mastoïdes ou en Cz (Milieu supérieur du crâne). Mais aujourd’hui, l’une des techniques les plus couramment utilisées est celle de la référence moyenne : le potentiel moyen de tout le scalp est calculé (valeur moyenne de toutes les électrodes) et soustrait à la valeur

Ceci est d’ailleurs vrai pour toute mesure d’un potentiel électrique, au bornes d’une pile par exemple

de chaque voie d'enregistrement. Cette dernière solution sera d'ailleurs celle utilisée dans la deuxième étude décrite au sein de cette thèse.

B.1.3 *L'amplification du signal*

Les différences de potentiel enregistrées grâce aux électrodes de surface sont de l'ordre du μV . Or, (1) le rapport signal/bruit a tendance à augmenter avec le transport du courant ; (2) les convertisseurs Analogique/Digital utilisés dans l'enregistrement des EEG mesurent des potentiels de l'ordre du μV . Ainsi, les potentiels enregistrés doivent être amplifiés à la source, avant leur transport vers le convertisseur. Une première amplification est faite au niveau du boîtier de connexion des électrodes, avec un amplificateur par électrode. Le courant passe ensuite, juste avant le convertisseur A/D (fréquence d'échantillonnage de 500 Hz), dans un amplificateur analogique. Avant tout enregistrement, une calibration est réalisée afin de vérifier que tous les amplificateurs fonctionnent, et amplifient le signal de façon homogène.

B.1.4 *Le filtrage*

Afin d'atténuer les effets de l'activité musculaire globale résiduelle, un filtrage passe-bande [0.1 à 100] Hz est réalisé au cours de l'acquisition.

B.1.5 *L'enregistrement*

Un enregistrement continu des potentiels de toutes les voies est réalisé tout au long de l'expérience. L'ordinateur enregistrant ces données reçoit deux autres types d'informations :

1. Le type et le temps d'apparition de chaque stimulation reçue par le sujet sont enregistrés, de manière à ce que l'on sache de manière exacte quelle stimulation le sujet a reçu, et à quel niveau de l'enregistrement EEG continu. Les stimuli sont indiqués sur le signal grâce à des « triggers » de stimulation.
2. Le type et le temps d'apparition de la réponse du sujet à la stimulation peuvent aussi, selon les besoins de l'expérience, être enregistrés. Ceci permet ensuite (a) de connaître la réponse du sujet ainsi que son temps de réaction moyen (TR) ; (b) d'enlever de l'enregistrement du signal les stimulations pour lesquelles il a fourni une réponse incorrecte ou dont le TR est aberrant. A la fin de la phase d'acquisition des données, l'expérimentateur a à sa disposition le signal EEG continu du sujet, sur lequel apparaissent chaque stimulation et chaque réponse. Les potentiels évoqués seront obtenus grâce à une succession de traitements effectués sur ce signal continu d'EEG.

B.2 LES POTENTIELS ÉVOQUÉS

Un Potentiel Evoqué (ou PE) est une modification de l'activité électrique intracérébrale basale provoquée par la survenue d'un stimulus interne ou externe. L'étude des PE en recherche fondamentale consiste en général à comparer les activations électriques induites par deux ou plusieurs types de stimulations (S_1 , S_2 ...). Au cours de l'acquisition

de l'EEG, le sujet réalisant l'expérience reçoit différentes stimulations dans un ordre aléatoire afin d'éviter tout effet d'habituation. Les modifications du tracé consécutives à un stimulus donné sont trop infimes pour être visibles à l'oeil nu et sont « noyées » dans le bruit de l'EEG spontané. Seule la répétition à plusieurs reprises du même stimulus peut mettre le phénomène en évidence : les modifications de l'activité EEG survenant dans une étroite période de temps à la suite d'un stimulus donné sont moyennées pour augmenter le rapport signal/bruit. On obtient ainsi un fichier moyenné par type de stimulation et par sujet. Dans la majorité des études, un groupe de sujets passe la même expérience, et les résultats obtenus sont moyennés pour s'affranchir de la variabilité inter-individuelle. On obtient alors un fichier moyenné entre les différents essais et les différents sujets, pour une condition donnée. Les différentes conditions de l'expérience peuvent alors être comparées à l'aide de différents tests statistiques réalisés sur le signal.

B.2.1 *Traitements préliminaires*

Les enregistrements continus sont tout d'abord filtrés. Un filtre passe-haut peut être réalisé afin de s'affranchir d'éventuelles dérives lentes dans les tracés. Par ailleurs, un filtre passe-bas est systématiquement appliqué aux enregistrements afin de filtrer le signal produit par le courant alternatif. Une correction des artefacts oculaires est ensuite appliquée aux enregistrements continus : en effet, les clignements oculaires induisent, principalement au niveau des électrodes frontales, d'importantes déviations de potentiels. Différents algorithmes peuvent être utilisés pour corriger ces variations, qui ont été enregistrées au cours de l'acquisition grâce à deux électrodes supplémentaires placées au-dessus et en dessous de l'oeil du sujet : après calcul de la moyenne et de la variance d'un clignement oculaire moyen (calcul basé sur le repérage dans le signal continu de 20 artefacts au minimum), l'influence de chaque clignement sur les différentes voies d'enregistrement est évaluée et corrigée. L'enregistrement continu est ensuite segmenté en n blocs (pour n stimulations) selon un intervalle pré- et post- stimulation défini par l'expérimentateur. Cette segmentation se fait en référence aux « triggers » présents dans l'enregistrement, signalant l'apparition de chaque stimulation, ainsi que son type (grâce à un codage numérique). Une correction de ligne de base est appliquée à tous les blocs, en se basant sur l'activité électrique moyenne précédant la stimulation.

B.2.2 *Obtention des potentiels évoqués*

Les blocs correspondant à des stimulations similaires sont moyennés, grâce aux « triggers ». Rappelons que cette étape est primordiale puisque les tracés de potentiels observés jusque là résultent de milliers d'activités différentes simultanées. En moyennant les tracés consécutifs à une même stimulation (environ 30-40 essais par sujet et par condition, cf. Picton et al. [222]), l'importance relative des courants électriques aléatoires par rapport à ceux associés à la tâche diminue, et il ne ressort que les potentiels générés par une stimulation (Potentiels Evoqués), dans la mesure où leur apparition est synchronisée par les « triggers ». Les tracés individuels de chaque condition sont ensuite moyennés au sein du groupe de sujets, et on obtient ce qui est classiquement appelé des « grandes moyennes ».

B.2.3 Visualisation des potentiels évoqués

Les PE peuvent être visualisés de deux façons : (1) les tracés de potentiels peuvent être observés, pour chaque voie d'enregistrement, sur un graphique représentant l'amplitude du potentiel au cours du temps (Figure 22 a). Ceci permet entre autre de repérer des pics positifs ou négatifs de potentiels ou de comparer les tracés de deux ou plusieurs électrodes, et de deux ou plusieurs conditions expérimentales. (2) Il est aussi possible de réaliser des cartographies de potentiels par interpolation des valeurs du potentiel en chaque électrode (Figure 22 b). Ceci permet de visualiser la distribution des PE sur tout le scalp, à un instant donné ou la distribution moyenne sur un période donnée.

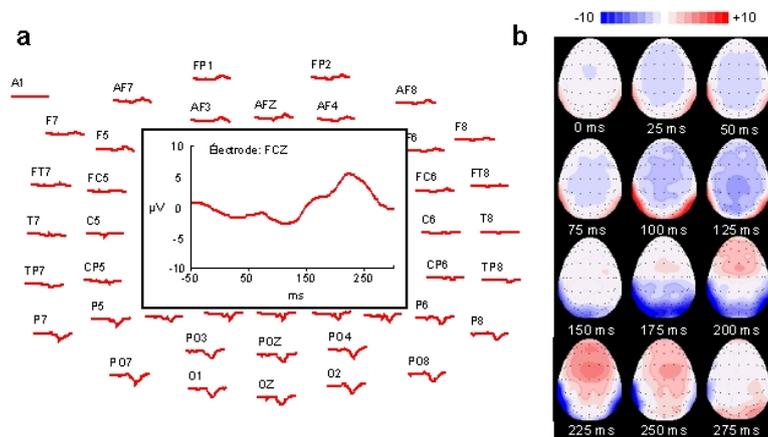


FIG. 22: Visualisation des Potentiels Evoqués. a. Tracés des amplitudes de potentiel en fonction du temps, sur 64 électrodes (zoom sur l'électrode centrale FCz). b. Cartographies de potentiels à 12 instants de l'enregistrement.

B.3 ANALYSES STATISTIQUES

B.3.1 Comparaison de latences et d'amplitudes de pics

Les analyses statistiques débutent par une observation des tracés obtenus avec les grandes moyennes. Ceci permet de repérer sur les courbes de potentiels les différents pics caractéristiques de la tâche. Pour chaque pic, une électrode de référence sera définie, l'électrode choisie étant généralement celle où l'amplitude de l'évènement est la plus grande. La latence du pic sera celle de l'électrode de référence. La fonction « Mean Global Field Power » des logiciels d'analyse est ensuite utilisée : elle permet de superposer sur un même axe les tracés de toutes les électrodes. Sur ce tracé global, on relève l'intervalle d'apparition de chaque pic. Manuellement ou à l'aide de programmes automatisés, on détecte alors la latence, l'amplitude et l'amplitude moyenne de chaque pic. La latence est la même pour chaque électrode et correspond à celle de l'électrode choisie en référence. L'amplitude du pic est celle relevée, sur chaque électrode, à la latence de référence. L'amplitude moyenne est, pour chaque électrode, la moyenne des amplitudes de tous les points de l'intervalle de recherche défini précédemment [222].

Latences, amplitudes et amplitudes moyennes sont comparées, entre les différentes conditions expérimentales, à l'aide d'ANOVA à mesures répétées. Les effets des différents facteurs analysés ainsi que leurs interactions sont calculés, pour chaque évènement électrophysiologique.

B.3.2 *Tests t en séries appariées*

Les tracés de PE peuvent aussi être comparés dans certaines régions du scalp sans qu'il y ait de pics de potentiels. Il est possible, dans ce cas de figure, de comparer deux conditions expérimentales, par test t en séries appariées : les différences individuelles entre deux conditions sont calculées, en chaque point du tracé de potentiel (une valeur de différence toutes les 2 ms pour un échantillonnage à 500 Hz). Un test t est ensuite réalisé sur la moyenne de ces différences. Il est possible de savoir si la différence entre les deux conditions est significative ou non, tout au long du décours temporel du tracé.

Title page

Title: Remediation effects on N170 and P300 in children with developmental dyslexia.

Authors: Mélanie Jucla^{1,2*}, Rodolphe Nenert^{1,3*}, Yves Chaix^{1,3,4}, Jean-François Demonet^{1,3,4}
(*: equally contributing authors)

Affiliations:

¹Inserm; Imagerie cérébrale et handicaps neurologiques UMR 825; F-31059 Toulouse, France.

²E.A Octogone. Laboratoire Jacques-Lordat, E.A 4156, Université Toulouse II Le Mirail, Toulouse, France

³Université de Toulouse; UPS; Imagerie cérébrale et handicaps neurologiques UMR 825; CHU Purpan, Place du Dr Baylac, F-31059 Toulouse Cedex 9, France.

⁴Centre Hospitalier Universitaire de Toulouse; Pole Neurosciences; CHU Purpan, Place du Dr Baylac, F-31059 Toulouse Cedex 9, France.

Corresponding author: Mélanie Jucla.

Address: Laboratoire Octogone-Lordat, Université de Toulouse le Mirail, Pavillon de la recherche, 5, allées Antonio Machado, F-31058 Toulouse Cedex, France.

Tel. +33(0) 561502469

Abstract

This study aimed at investigating the ERP correlates (N170 and P300 components) of a multimodal training program focused in dyslexia. ERPs were obtained from 32 electrodes in 24 French children with developmental dyslexia (mean age 10 years 7 months) during a visual lexical decision task. All the children received two intensive two-month evidence-based training programs: one based on phonemic awareness and the other on visual and orthographic processing in a cross-over design. Ten control children matched on chronological age were also tested. We showed dissociation between N170, P300 and behavioral improvement. In the dyslexic group, P300 amplitude decreased for non-words and words as the latter yielded performance improvement. In the control group, the same effect was observed for pseudo-words. At the same time, the opposite pattern occurred for the N170 latency, which was shortened for pseudo-words and pseudo-homophones in the dyslexic group and for words in the typically achieving children. We argue that training might modulate cortical activity in dyslexic children in a visual word recognition task. Considering the well-known implication of P300 in attentional processes, our results reflect the strong link between reading skill improvement after remediation and visual attentional process maturation.

Keywords: Developmental dyslexia, Remediation, Children, Phonological, Visual Attention, ERPs.

Body of text

1. Introduction

Dyslexia, or reading difficulty, is one of the most common problems that severely affect academic performance. It is revealed as a difficulty in learning to read despite conventional teaching, without being the direct result of any intellectual disadvantage or unfavorable environmental influence [2]. It is still not precisely known what factors prevent normal acquisition of reading abilities, as reading is a complex phenomenon. In the last 20 years, the most convergent evidence has arisen from the phonological deficit hypothesis, according to which the difficulties suffered by dyslexic children in identifying words in a text are due to deficiencies in their ability to segment the flow of speech into its sound components, also known as phonological awareness [33, 47-50]. However, alternative explanations have been suggested, implicating visual attention [15]. Recently, Valdois and collaborators [4] found a link between visuo-attentional span and reading process. The authors suggest that phonological and visuo-attentional skills are implied in reading efficiency, considering that their alteration results in poor performance in tasks that permit developmental dyslexia to be characterized.

Several remediation programs have been suggested for dyslexia, each of them focusing on one 'core' deficit. Several studies have shown significant improvement in reading skills using remediation programs based on phonological processing only [18] (see Beaton for a review [2]) or instruction combining phonic coding and literacy skills [25, 54]. Magnan and collaborators used audiovisual software to train dyslexic children in grapheme-phoneme correspondence rules [26, 27]. They found significant improvement in word recognition after training. However, Alexander and Slinger-Constant underlined the fact that, despite improvements observed after training, a substantial number of dyslexic children resist treatment, whatever the remediation modality [1].

The event-related potential (ERP) technique has allowed researchers to decompose the cognitive process of word reading into temporal phases. With regard to our interest in developmental impairment, two crucial components have been identified:

The first peak around 170 ms after the stimulus onset (N170 hereafter) is thought to reflect the first cognitive orthographic process with a source in occipito-temporal regions [22, 37]. Some authors infer that this component reflects the first letter-specific treatment compared to that of any other symbol [41]. In addition, its amplitude is larger after word or even pseudo-word (i.e. pronounceable meaningless letter sequence) than non-word (i.e. illegal letter sequence as for instance string of consonants) presentation, suggesting a pre-lexical component [3, 8, 28, 30, 32, 36]. However, this component has been found to be modulated by word lexical frequency [45, 46]. These latter works suggest that N170 may also reflect lexical access in single word reading. This component has been found to differ in dyslexic subjects compared to controls in several studies, generally revealing a higher latency and lower amplitude in dyslexic subjects [19, 41, 42, 51, 52]. N170 amplitude increase during reading learning seems to characterize reading level. In a longitudinal study, Maurer et al. showed that N170 amplitude increased with learning and that this effect was reduced in children with reading impairment [29].

The second component is a positive wave that occurs around 300 ms after stimulus presentation (P300 hereafter) and is known to reflect the amount of attentional resources involved in a task [21, 57]. However, considering written word processing, it has been found that word recognition elicits a higher P300 [40] and a lack of P300 when subjects are stimulated with pseudo-homophones or words with internal case changes [44]. Moreover, Duncan et al. observed P300 anomalies in adults with dyslexia who had also suffered from attentional disorder during childhood [12]. Thus, considering that attentional disorders are frequently observed in dyslexic subjects, it is difficult to resolve whether P300 anomalies are only due to dyslexia or associated with attention disorders [53].

Few studies address the question of the consequence of remediation on the temporal course of written word processing in dyslexia. Recently, Santos et al. studied the effects of a training program based on both phonemic awareness and grapheme-phoneme correspondence exercises [9, 17, 18] on auditory language semantic integration [43]. Before training, ERPs (between 200 and 700 ms) were modulated by incongruity in the typically achieving children only. After training the same effect was observed in the dyslexic group.

The aim of the present paper is to study the ERP correlates of a multimodal evidence-based remediation program that focused on two major deficits in dyslexia, phonological and visual attentional. With this in mind, we analyzed two crucial components, the N170 and P300 in a lexical decision task using a typical Oddball paradigm in dyslexic children that followed our program compared to typically achieving children as a baseline. We hypothesized that control subjects should show larger N170 and P300 with shorter latencies than dyslexic children and that the latter should present a more typical pattern of activity after remediation.

2. Methods

2.1 Participants

24 French-native-speaker dyslexic children from 9 to 11 years old (9 girls and 15 boys) were recruited. All subjects had an IQ >80 as tested with WISC-III [56] and a reading delay of at least 18 months as tested by a standardized French reading test (L'Alouette, [24]). All subjects satisfied developmental dyslexia diagnosis criteria according to ICD-10 classification (WHO, 1993). They had no specific attentional disorder as tested by the D2 test [5], no oral language delay as tested by L2MA [6] and TCG [10] and no comprehension disorder as tested by ECOSSE [23].

In addition, 11 French-native-speaker control children from 9 to 11 years old (4 girls and 7 boys) were also recruited. They had no IQ deficit or reading level delay, as tested by WISC-III [56] and

the “Alouette” tests [24] respectively. Nor chronological age neither IQ differed between the control group and the dyslexic group (resp. $p=0.15$ and $p=0.14$).

2.2 Remediation program

Training sessions were implemented six days a week and lasted from ten to twenty minutes each day. Children were assisted by their parents at home or by their speech therapist, who switched from the usual therapy to these programs. Before each training period, specific material (stimuli and exercises, audio CD and notebooks) was delivered to the parents and detailed explanations and examples were provided (written directions were also given). Adults were asked to provide feedback to the child, especially in case of erroneous responses. They were taught how to use the material and what instructions and feedback to give the child during a one-hour training session. After each training period, exercise notebooks were collected and reviewed, and a debriefing with the parents and the speech therapist was held in order to check the reliability of the interventions. Data from one child were discarded because of lack of precision and compliance in the training program (this child was not included in the sample described above).

The phonological training

This training was derived from that used in Habib et al. [18]. Stimuli were presented through headphones from an audio CD. The adult had to give the instructions and take note of the child’s answers in an exercise book. There were 6 exercises per day. The typical pattern of exercises was different between weeks 1, 3, 5 and weeks 2, 4, 6.

Exercises proposed during weeks 1, 3 and 5 were as follows:

The first three exercises contained triplets of words the child had to compare phonologically to disclose similarity between 2 of the 3 stimuli, either in the rhyme, the onset, or the middle part of words (for example, “which words rhyme among the triplet “boat”, “coat”, “bowl”?”). The other

exercises consisted of syllable counting, phoneme detection (“How many times can you hear the sound /s/ in ‘sausage?’”) and finally, word repetition.

Exercises proposed during weeks 2, 4 and 6 were as follows:

The items were pseudo-words during weeks 2 and 6, and words during week 4. In the first two exercises, the children were asked to find the odd word among three pseudo-words or words. The oddity was based on the rhyme (exercise 1) or the onset (exercise 2). In the third exercise, the children had to find a target phoneme in one of the three pseudo-words or words. Then a phoneme counting task was proposed followed by spoonerisms (based on words). Finally the child had to repeat pseudo-words or words.

The visual training

The visual training was split into two different parts.

The first 3 weeks consisted of non-verbal visual attentional training while the second 3 weeks consisted in a shift of visual attention and perception exercises from the non-verbal to the verbal domain. The first, non-verbal phase was meant to provide initial training so that children could become familiar with heavy-duty exercises on visual/graphic stimuli. The second phase also involved visual stimuli but they consisted of orthographic material.

The first-phase, non-verbal exercises were derived from various tests and rehabilitation sets used in speech therapy for dyslexia remediation. The exercises mainly focused on:

- Space organization: path finding through a maze-like design, drawing a path by following arrows or between an arrangement of points identical to that represented on a model,
- Visual attention: identifying superposed geometrical forms, matching a drawing to sample, coding, matching nonsense figures by sticking them on the model, superposing geometrical figures with their matching model drawn on a transparency sheet.
- Logic: matrix completion tasks.

Responses were checked and corrected by the parents or the speech therapist.

The second 3-week period was a specific visual orthographic training that had been built up for a previous study in our laboratory with the cooperation of speech therapists (see typical examples of exercises in Appendix C). The goal of this part was to enhance access to orthographic knowledge and lead subjects to work out and visualize word orthography mentally. The exercises mainly focused on:

- Shape of letters and words: for each letter in an orally presented word, saying if it went up (e.g. “d”), down (e.g. “p”) or in the middle (e.g. “e”); identifying if a “shadow envelope” could hide a target word.
- Searching for a word or a letter: identifying a word embedded in a string of letters; chunking a text presented without spaces; linking spread letters according to a model word; letter cancellation task.
- Orthographic knowledge: spelling out or counting the letters in an orally presented word and writing it down; naming the letters situated just before and after a target letter in an orally presented word.
- Word comparisons: similarity judgment task in word pairs; choosing which of four choices was identical to the model; finding the missing letter in a word; identifying the longest word.
- Reading a word presented in an unusual manner: vertically; around a circle.
- Converting a non-word presented in upper case letters into lower case or the contrary.

2.3 Procedures

In order to avoid any order effect in remediation, 12 dyslexic children first followed the phonological remediation then the visual remediation. The other 12 dyslexic children started with the visual remediation then followed the phonological remediation. Children were included in one of the two groups by alternation. All children underwent EEG recording twice: before the training (Session 1) and after training (Session 2, 19 weeks after session 1).

During each EEG session, ERPs were obtained for each child, who had to complete a visual lexical decision task. This task involved 128 items that were distributed over 4 conditions in an Oddball paradigm: 32 words, 32 pseudo-words (pronounceable meaningless sequences), 32 pseudo-homophones (same phonology as, different spelling than a real word) and 32 non-words (unpronounceable letter sequences). This particular stimuli distribution was made to elicit maximum subject attention over word stimuli. Three lists of 128 items were created in order to have different stimuli in each EEG session; these lists were balanced for lexical frequency, number of letters, and syllable structure. List order was counterbalanced between subjects.

Subjects were comfortably seated in front of a screen in a quiet room. During the task, a centrally located fixation cross stimulus first appeared for 500 ms, then one item appeared for 250 ms, followed by a fixation cross again. Inter-stimulus interval varied between 1700 and 2000 ms. The subjects were explicitly asked to indicate whether the sequence presented was a French word by pressing one of two designated keys using both hands. The use of the right versus the left index to designate real words was alternated between subjects.

2.4 ERP acquisition

The electroencephalogram (EEG) was recorded with a 0.1-100 Hz filter and a 500Hz sampling rate using Neuroscan 4.2 software and a 32-electrode Neuroscan device (Ag-AgCl electrodes). Impedances for all electrodes were kept below 5 kohms. The vertex electrode was used as the recording reference. Eye-movements were monitored with two electrodes: one placed above the left eye and one placed on the right temple.

The epochs contaminated by eye-movements or artifacts of non-biological origin producing voltages larger than +/- 125 μ V peak-to-peak were omitted from averaging.

The ERPs were digitally filtered with a low-pass filter of 30 Hz (12dB/Octave, zerophase-type filter) and a high-pass filter of 0.5 Hz (12dB/Octave, zerophase-type filter).

The analysis epoch began 100 ms before and terminated 1200 ms after stimulus onset.

A baseline correction was applied from -100 ms to 0 ms. Average reference was applied to all ERPs.

2.5 Analyses

Behavioral statistics.

Data from one dyslexic child was discarded due to a problem in response recording. An ANOVA with repeated measures was carried out on number of correct answers (accuracy rate) with Session (session 1 and 2) X Condition (words, pseudo-words, pseudo-homophones and non-words) as intra-individual factors and group (experimental group and control group) as inter-individual factor.

ERP statistics.

In a first step, we conducted an automatic peak research on defined time windows (using the Global Field Power (GFP) of 32 electrodes on average waves in the control group [35]): [150 – 250] ms for N170 and [250 – 400] ms for P300.

Data from two dyslexic children were discarded due to a problem in signal recording. Peak mean amplitudes and latencies were analyzed using ANOVA with repeated measures on the electrodes that showed the highest sensitivity: P7, P8, PO9, PO10, O1 and O2. Session (before/after training), condition (non-word, pseudo-word, homophone and word), hemisphere (right/left) and electrode were considered as intra-individual factors. Group (dyslexic versus control) was considered as an inter-individual factor. To clarify the results described below, we have chosen not to report main effect or interactions involving the ‘electrode’ factor.

3. Results

3.1 Behavioral results

Raw scores (and SD) are presented in table 1. Analysis on the accuracy rate revealed a significant group effect ($F(1,32)=5.65$, $p=0.023$), dyslexic children being less efficient than control children. Both groups showed a significant improvement between two sessions ($F(1,32)=4.71$, $p=0.037$).

Performance was affected by condition ($F(3,96)=15.72$, $p<0.001$). A post-hoc Tukey test showed that the non-word condition was the easiest (significant difference between non-words and words – $p<0.05$ – and both types of pseudo-words – $p<0.001$) and pseudo-homophones were the hardest (difference between pseudo-homophones and words, non-words – $p<0.001$ – and pseudowords – $p<0.05$). Session x Group or Condition x Group interactions were not significant whereas a Session x Condition x Group interaction was significant ($F(3,96)=2.76$, $p=0.046$). A post-Hoc Tukey test showed that, in the control group, in session 1, pseudo-homophones were significantly less well identified than words ($p<0.05$). This difference disappeared in session 2. In the dyslexic group, words were significantly less well identified than non-words in session 1 ($p<0.05$). This difference disappeared in session 2 due to an improvement in word identification.

3.2 ERP results

Curves are depicted in Figure 1.

N170: Peak latency analysis showed that only the Session x Group x Condition interaction was significant ($F(3,93)=3.97$, $p=0.01$). According to the post hoc analysis (Fisher LSD test), latency was found to be smaller in session 2 compared to session 1 for non-words in the control group ($p<0.005$) and for pseudo-words in the dyslexic group ($p=0.06$).

Peak mean amplitude analysis also showed that only the Session x Group x Condition interaction was significant ($F(3,93)=2.87$, $p<0.05$), the amplitude being smaller in dyslexic children for pseudo-words and pseudo-homophones after training (Tukey test; resp. $p<0.001$ and $p<0.005$).

P300: Peak latency analysis showed that only the Session x Group interaction was significant ($F(1,31)=4.2$, $p<0.05$), control children having smaller latency in session 2 (Fisher LSD test; $p=0.06$).

Peak mean amplitude analysis showed a Condition main effect as a Condition x Hemisphere significant interaction (respectively $F(3,93)=4.6$, $p<0.005$ and $F(3,93)=5.23$, $p<0.005$). The mean

amplitude was higher for words compared to both types of pseudo-words (Tukey test; $p < 0.001$) and non-words ($p < 0.05$) in the left hemisphere only. Session X Condition X Group interaction was significant ($F(3,93) = 4.08$, $p < 0.01$), showing an amplitude decrease in the control group for both types of pseudo-words ($p < 0.005$) and in the dyslexic group for words and non-words ($p < 0.001$) in session 2 compared to session 1.

4. Discussion

In this study we have investigated the neural correlates of reading improvement after intervention in developmental dyslexia. We analyzed dyslexic children's ERPs elicited by a lexical decision task before and after a four-month phonological and visual orthographic training program. We compared their data to those of typically achieving children as a baseline before and after the period of four months. We were interested in the main effects of group, task condition, session and interactions between these parameters.

If we first look at the main group effects, not surprisingly, dyslexic children were found to have poorer behavioral performance on the visual lexical decision task. This supports the orthographic encoding deficit in dyslexia [11].

We also highlighted main condition effects in behavioral and electrophysiological data in both groups. First, considering accuracy scores, the non-word condition was easier to address than the pseudo words, pseudo-homophones and even words. According to the DRC reading model, processing an unpronounceable letter sequence and deciding it is not a word is faster because one does not have to process more than orthotactic information [7]. For pseudo-words, the subject has to activate a phonological content and then may check whether it activates semantic information. Furthermore, the latter could be responsible for the specific difficulty in addressing the pseudo-homophones. Processing a homophone yields a mismatch between the current orthographic visual input and the orthographic information that is sent back after the corresponding semantic contents

have been activated. While this effect is crucial during reading acquisition, it is known that the orthographic lexicon is not stable at the maturational stage [16] corresponding to the children we studied (mean chronological age 10 years).

Secondly, looking at the ERPs results, we observed that words elicited a higher P300 amplitude than other stimuli (non-words and pseudo-words) in both groups. This finding may be interpreted as a typical attentional effect when target occurrence is less frequent than distracters [34, 38]. In our paradigm, real words only represented 25% of items. However, this difference only occurred in the left hemisphere, showing a possible supplementary attentional load due to lexical treatment in this hemisphere [14].

We could not demonstrate a main session effect but complex session x condition x group interactions were found in behavioral and electrophysiological results (see Table 2). Both groups showed improvement in the task and a decrease of N170 latency and P300 mean amplitude. As the control group did not receive any specific training, this could easily be attributed to procedural learning of the task. Nevertheless, the specificity of these modulations of activity according to the group and condition suggests a more complex interpretation of these findings.

A relationship between behavioral and electro-physiological changes seems to emerge, showing dissociation between N170, P300 and behavioral changes (see Table 2). In the dyslexic group, P300 amplitude decreased for non-words and words whereas the latter yielded performance improvement. In the control group, the same effect was observed for pseudo-words. At the same time, the opposite pattern occurred for the N170 latency, which was shortened for pseudo-words and pseudo-homophones in the dyslexic group (the latter result being associated with a decrease of the peak mean amplitude) and for words in the typically achieving children without any correlates on behavioral results. These results raise two questions. First, why would electrophysiological change be related with behavioral improvement only for the P300 component? Second, why did we observe an opposite condition effect depending to the group?

In this study, we used a lexical decision task in an oddball paradigm in order to investigate both orthographic and attentional processing. It appeared that the task required heavy attentional load due to short presentation time. As shown in table 1, an important variance in the performance of the two groups was observed. Taking this into account and the variance in electrophysiological data, we might be facing a basic problem of statistical power that could not allow showing more effects. Therefore, due to the attentional demand required by the task, P300 effects might be more robust than N170 ones. It would be of interest to further investigate our hypothesis on the N170 component on a classic lexical decision task with a greater group of subjects. Moreover, we argue that a possible behavioral improvement in this specific task would more rely on attention than orthographic processing skills. In their remediation study, Santos et al., [43] put forward ERP change in the P300 component after an audiovisual training program in dyslexia in a pitch incongruity perception task. They argue that the training provides better skills in detection tasks. Furthermore, other learning studies have shown a great sensitivity of the P300 component to cognitive changes occurring after training [20, 31, 39].

Moving to our second question, one may wonder whether the changes observed in the two groups, with opposite effects of conditions, rely on the same processes in both groups. We argue that the mechanisms involved are different in the dyslexic compared to typically achieving children. In the control group, it may be suggested that procedural learning accounted for an improvement of performance on pseudo-words; this processing facilitation might account for P300 amplitude decrease as a result of decreased attentional load. This effect would only appear for the pseudo-words as performance on identification of both non-words and words in this group was already high at session 1 (resp. 82% and 75%) while subjects were less accurate for pseudo-words and pseudo-homophones (resp. 65% and 56%). Concerning dyslexic children, if their improvement had been only related to procedural learning, we would have expected performance increase to be independent of condition; and these subjects were deficient in all conditions compared to their peers. Instead, the training received might be at least partly responsible for the observed difference

between conditions. The training was built, first, to improve visual attention and phonemic awareness and, second, to enhance the lexical route for reading, which permits good literacy skills in proficient pupils [13]. From orthographic representation to phonological coding, the children in the present study were taught how to implicitly use this route. According to the visual attention span deficit theory [55], word recognition requires a higher attentional level in dyslexic children, especially when they are confronted with long orthographic sequences [4]. So the decrease of P300 amplitude in the word condition may result from a reduced allocation of attention resources to these stimuli because of a better word identification (a specific improvement in reading process).

5. Conclusion

In this study, we have shown that cortical activity in dyslexic children in a visual word recognition task might be modulated by training.

However, only P300 modifications were related to behavioral improvement, both in dyslexic and in control subjects. Considering the well-known implication of P300 in attentional processes, our results reflect the strong link between reading skill improvement after remediation and visuo-attentional process maturation.

Acknowledgement

We would like to thank Margot Taylor, Magali Batty, Marianne Latinus, Chloé de Boysson, Maria Trabanino, Stéphanie Iannuzzi, Evelyne Calvet, and Isabelle Barry for their help in the preparation and execution of this experiment. In its first phase, this research was supported by the INSERM program “PROGRES” and by a grant from the Clinical Research Hospital Program from the French Ministry of Health (PHRC 2002, University Hospital of Toulouse N° 0203208) and then by the “ARS 2000” program of the French Foundation for Medical research (“Fondation Recherche Médicale”).

References

- [1] Alexander, A.W. and A.M. Slinger-Constant, *Current status of treatments for dyslexia: critical review*. J Child Neurol, 2004. **19**(10): p. 744-58.
- [2] Beaton, A., *Dyslexia, reading and the brain : a sourcebook of psychological and biological research*. 2004, Hove: Psychology. viii, 348.
- [3] Bentin, S., Y. Mouchetant-Rostaing, M.H. Giard, J.F. Echallier, and J. Pernier, *ERP manifestations of processing printed words at different psycholinguistic levels: time course and scalp distribution*. J Cogn Neurosci, 1999. **11**(3): p. 235-60.
- [4] Bosse, M.L., M.J. Tainturier, and S. Valdois, *Developmental dyslexia: The visual attention span deficit hypothesis*. Cognition, 2007. **104**(2): p. 198-230.
- [5] Brickenkamp, R., *Test d'attention concentrée : d2*. 1998, Paris: Les Editions du Centre de Psychologie Appliquée.
- [6] Chevrie-Muller, C., A.M. Simon, and S. Fournier, *Batterie Langage oral et écrit. Mémoire. Attention. (L2MA)*. 1997, Paris: Editions du Centre de Psychologie Appliquée.
- [7] Coltheart, M., K. Rastle, C. Perry, R. Langdon, and J. Ziegler, *DRC: a dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud*. Psychol Rev, 2001. **108**(1): p. 204-56.
- [8] Cornelissen, P., A. Tarkiainen, P. Helenius, and R. Salmelin, *Cortical effects of shifting letter position in letter strings of varying length*. J Cogn Neurosci, 2003. **15**(5): p. 731-46.
- [9] Danon-Boileau, L. and D. Barbier, *Play-On: Un logiciel d'entraînement à la lecture*. 2002, Audivi-Média: Paris.
- [10] Deltour, J.J., *Test de closure grammaticale (révisé). (TCG-R)*. 1998, Paris: EAP.
- [11] Démonet, J.F., M.J. Taylor, and Y. Chaix, *Developmental dyslexia*. Lancet, 2004. **363**(9419): p. 1451-60.
- [12] Duncan, C.C., J.M. Rumsey, S.M. Wilkniss, M.B. Denckla, S.D. Hamburger, and M. Odou-Potkin, *Developmental dyslexia and attention dysfunction in adults: brain potential indices of information processing*. Psychophysiology, 1994. **31**(4): p. 386-401.
- [13] Ellis, A.W., *Reading, writing and dyslexia : a cognitive analysis*. 1984, London: Lawrence Erlbaum Associates. 147.
- [14] Ellis, A.W., R. Ferreira, P. Cathles-Hagan, K. Holt, L. Jarvis, and L. Barca, *Word learning and the cerebral hemispheres: from serial to parallel processing of written words*. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci, 2009. **364**(1536): p. 3675-96.
- [15] Facoetti, A., P. Paganoni, M. Turatto, V. Marzola, and G.G. Mascetti, *Visual-spatial attention in developmental dyslexia*. Cortex, 2000. **36**(1): p. 109-23.
- [16] Fayol, M. and J.-P. Jaffré, *Orthographier*. 1re éd. ed. Apprendre. 2008, Paris: Presses universitaires de France. 232 p.
- [17] Habib, M., R. Espesser, V. Rey, K. Giraud, P. Bruas, and C. Gres, *Training dyslexics with acoustically modified speech: evidence of improved phonological performance*. Brain & Cognition, 1999. **40**: p. 143-146.
- [18] Habib, M., V. Rey, V. Daffaure, R. Camps, R. Espesser, B. Joly-Pottuz, and J.F. Demonet, *Phonological training in children with dyslexia using temporally modified speech: a three-step pilot investigation*. Int J Lang Commun Disord, 2002. **37**(3): p. 289-308.
- [19] Helenius, P., A. Tarkiainen, P. Cornelissen, P.C. Hansen, and R. Salmelin, *Dissociation of normal feature analysis and deficient processing of letter-strings in dyslexic adults*. Cereb Cortex, 1999. **9**(5): p. 476-83.
- [20] Key, A.P., D.L. Molfese, and E.D. Ratajczak, *ERP indicators of learning in adults*. Dev Neuropsychol, 2006. **29**(2): p. 379-95.
- [21] Kramer, A.F. and D.L. Strayer, *Assessing the development of automatic processing: an application of dual-task and event-related brain potential methodologies*. Biol Psychol, 1988. **26**(1-3): p. 231-67.
- [22] Kuriki, S., F. Takeuchi, and Y. Hirata, *Neural processing of words in the human extrastriate visual cortex*. Brain Res Cogn Brain Res, 1998. **6**(3): p. 193-203.

- [23] Lecocq, P., *L'É.CO.S.SE : une épreuve de compréhension syntaxico- sémantique*. Psychologie cognitive. 1996, Villeneuve d'Ascq (France): Presses universitaires du Septentrion.
- [24] Lefavrais, P., *Test de l'Alouette : Manuel*. 1967, Paris: Les Editions du Centre de Psychologie Appliquée.
- [25] Lovett, M.W., M.J. Ransby, N. Hardwick, M.S. Johns, and S.A. Donaldson, *Can dyslexia be treated? Treatment-specific and generalized treatment effects in dyslexic children's response to remediation*. Brain Lang, 1989. **37**(1): p. 90-121.
- [26] Magnan, A. and J. Ecalle, *Audio-visual training in children with reading disabilities*. Computers & Education, 2006. **46**(4): p. 407-425.
- [27] Magnan, A., J. Ecalle, E. Veuillet, and L. Collet, *The effects of an audio-visual training program in dyslexic children*. Dyslexia, 2004. **10**(2): p. 131-40.
- [28] Martin, C.D., T. Nazir, G. Thierry, Y. Paulignan, and J.F. Demonet, *Perceptual and lexical effects in letter identification: an event-related potential study of the word superiority effect*. Brain Res, 2006. **1098**(1): p. 153-60.
- [29] Maurer, U., S. Brem, K. Bucher, F. Kranz, R. Benz, H.C. Steinhausen, and D. Brandeis, *Impaired tuning of a fast occipito-temporal response for print in dyslexic children learning to read*. Brain, 2007. **130**(Pt 12): p. 3200-10.
- [30] Nobre, A.C., T. Allison, and G. McCarthy, *Word recognition in the human inferior temporal lobe*. Nature, 1994. **372**(6503): p. 260-3.
- [31] Paller, K.A., M. Kutas, and A.R. Mayes, *Neural correlates of encoding in an incidental learning paradigm*. Electroencephalogr Clin Neurophysiol, 1987. **67**(4): p. 360-71.
- [32] Pammer, K., P.C. Hansen, M.L. Kringelbach, I. Holliday, G. Barnes, A. Hillebrand, K.D. Singh, and P.L. Cornelissen, *Visual word recognition: the first half second*. Neuroimage, 2004. **22**(4): p. 1819-25.
- [33] Pennington, B.F., G.C. Van Orden, S.D. Smith, P.A. Green, and M.M. Haith, *Phonological processing skills and deficits in adult dyslexics*. Child Dev, 1990. **61**(6): p. 1753-78.
- [34] Picton, T.W., *The P300 wave of the human event-related potential*. J Clin Neurophysiol, 1992. **9**(4): p. 456-79.
- [35] Picton, T.W., S. Bentin, P. Berg, E. Donchin, S.A. Hillyard, R. Johnson, Jr., G.A. Miller, W. Ritter, D.S. Ruchkin, M.D. Rugg, and M.J. Taylor, *Guidelines for using human event-related potentials to study cognition: recording standards and publication criteria*. Psychophysiology, 2000. **37**(2): p. 127-52.
- [36] Proverbio, A.M., B. Cok, and A. Zani, *Electrophysiological measures of language processing in bilinguals*. J Cogn Neurosci, 2002. **14**(7): p. 994-1017.
- [37] Proverbio, A.M. and A. Zani, *Time course of brain activation during graphemic/phonologic processing in reading: an ERP study*. Brain Lang, 2003. **87**(3): p. 412-20.
- [38] Ritter, W. and H.G. Vaughan, Jr., *Averaged evoked responses in vigilance and discrimination: a reassessment*. Science, 1969. **164**(877): p. 326-8.
- [39] Rose, M., R. Verleger, and E. Wascher, *ERP correlates of associative learning*. Psychophysiology, 2001. **38**(3): p. 440-50.
- [40] Rudell, A.P. and J. Hua, *The recognition potential, word difficulty, and individual reading ability: on using event-related potentials to study perception*. J Exp Psychol Hum Percept Perform, 1997. **23**(4): p. 1170-95.
- [41] Salmelin, R., P. Helenius, and E. Service, *Neurophysiology of fluent and impaired reading: a magnetoencephalographic approach*. J Clin Neurophysiol, 2000. **17**(2): p. 163-74.
- [42] Salmelin, R., E. Service, P. Kiesila, K. Uutela, and O. Salonen, *Impaired visual word processing in dyslexia revealed with magnetoencephalography*. Ann Neurol, 1996. **40**(2): p. 157-62.
- [43] Santos, A., B. Joly-Pottuz, S. Moreno, M. Habib, and M. Besson, *Behavioural and event-related potentials evidence for pitch discrimination deficits in dyslexic children:*

- improvement after intensive phonic intervention. Neuropsychologia, 2007. 45(5): p. 1080-90.*
- [44] Sauseng, P., J. Bergmann, and H. Wimmer, *When does the brain register deviances from standard word spellings?--An ERP study. Brain Res Cogn Brain Res, 2004. 20(3): p. 529-32.*
- [45] Sereno, S.C., C.C. Brewer, and P.J. O'Donnell, *Context effects in word recognition: evidence for early interactive processing. Psychol Sci, 2003. 14(4): p. 328-33.*
- [46] Sereno, S.C., K. Rayner, and M.I. Posner, *Establishing a time-line of word recognition: evidence from eye movements and event-related potentials. Neuroreport, 1998. 9(10): p. 2195-200.*
- [47] Snowling, M.J., *Dyslexia*. 2 ed. 2000, Oxford: Blackwell.
- [48] Snowling, M.J., *From language to reading and dyslexia. Dyslexia, 2001. 7(1): p. 37-46.*
- [49] Snowling, M.J., N. Goulandris, M. Bowlby, and P. Howell, *Segmentation and speech perception in relation to reading skill: a developmental analysis. J Exp Child Psychol, 1986. 41(3): p. 489-507.*
- [50] Stanovich, K.E. and L.S. Siegel, *The phenotypic performance profile of reading-disabled children: a regression based test of the phonological core variable-difference model. Journal of Educational Psychology, 1994. 86: p. 24-53.*
- [51] Tarkiainen, A., P. Helenius, P.C. Hansen, P.L. Cornelissen, and R. Salmelin, *Dynamics of letter string perception in the human occipitotemporal cortex. Brain, 1999. 122 (Pt 11): p. 2119-32.*
- [52] Taroyan, N.A. and R.I. Nicolson, *Reading words and pseudowords in dyslexia: ERP and behavioural tests in English-speaking adolescents. Int J Psychophysiol, 2009. 74(3): p. 199-208.*
- [53] Taylor, M.J., *The role of event-related potentials in the study of normal and abnormal cognitive development, in Handbook of neuropsychology, F. Boller and J. Grafman, Editors. 1995, Elsevier: Amsterdam ; New York. p. 187-211.*
- [54] Torgesen, J.K., A.W. Alexander, R.K. Wagner, C.A. Rashotte, K.K. Voeller, and T. Conway, *Intensive remedial instruction for children with severe reading disabilities: immediate and long-term outcomes from two instructional approaches. J Learn Disabil, 2001. 34(1): p. 33-58, 78.*
- [55] Valdois, S., M.L. Bosse, and M.J. Tainturier, *The cognitive deficits responsible for developmental dyslexia: review of evidence for a selective visual attentional disorder. Dyslexia, 2004. 10(4): p. 339-63.*
- [56] Wechsler, D., *Echelle d'intelligence Wechsler pour enfants*. 1996, Paris: Les Editions du Centre de Psychologie Appliquée.
- [57] Wickens, C., A. Kramer, L. Vanasse, and E. Donchin, *Performance of concurrent tasks: a psychophysiological analysis of the reciprocity of information-processing resources. Science, 1983. 221(4615): p. 1080-2.*

Tables

Group	Pseudo-homophones		Non-words		Words		Pseudo-words	
	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2
Dyslexic	44.7 (22.2)	48.0 (21.1)	68.0 (26.5)	69.5 (26.3)	55.3 (24.6)	63.6 (20.2)	51.4 (23.7)	55.7 (19.1)
Control	56.5 (24.0)	60.1 (24.5)	82.1 (21.0)	84.6 (20.0)	75.3 (17.9)	70.3 (21.1)	65.2 (21.8)	80.8 (18.2)

Table . Results obtained (% of accuracy) in different conditions of the visual lexical decision task in dyslexic and control group. S1 stands for session 1 (resp. S2 for session 2). Standard deviation is in brackets.

Observed effect	Dyslexic group	Control group
Recognition improvement	Words	Pseudo-homophones
N170 latency decrease	Pseudo-words	Non-words
N170 amplitude decrease	Pseudo-words and pseudo-homophones	/
P300 amplitude decrease	Words and Non-words	Pseudo-words and pseudo-homophones

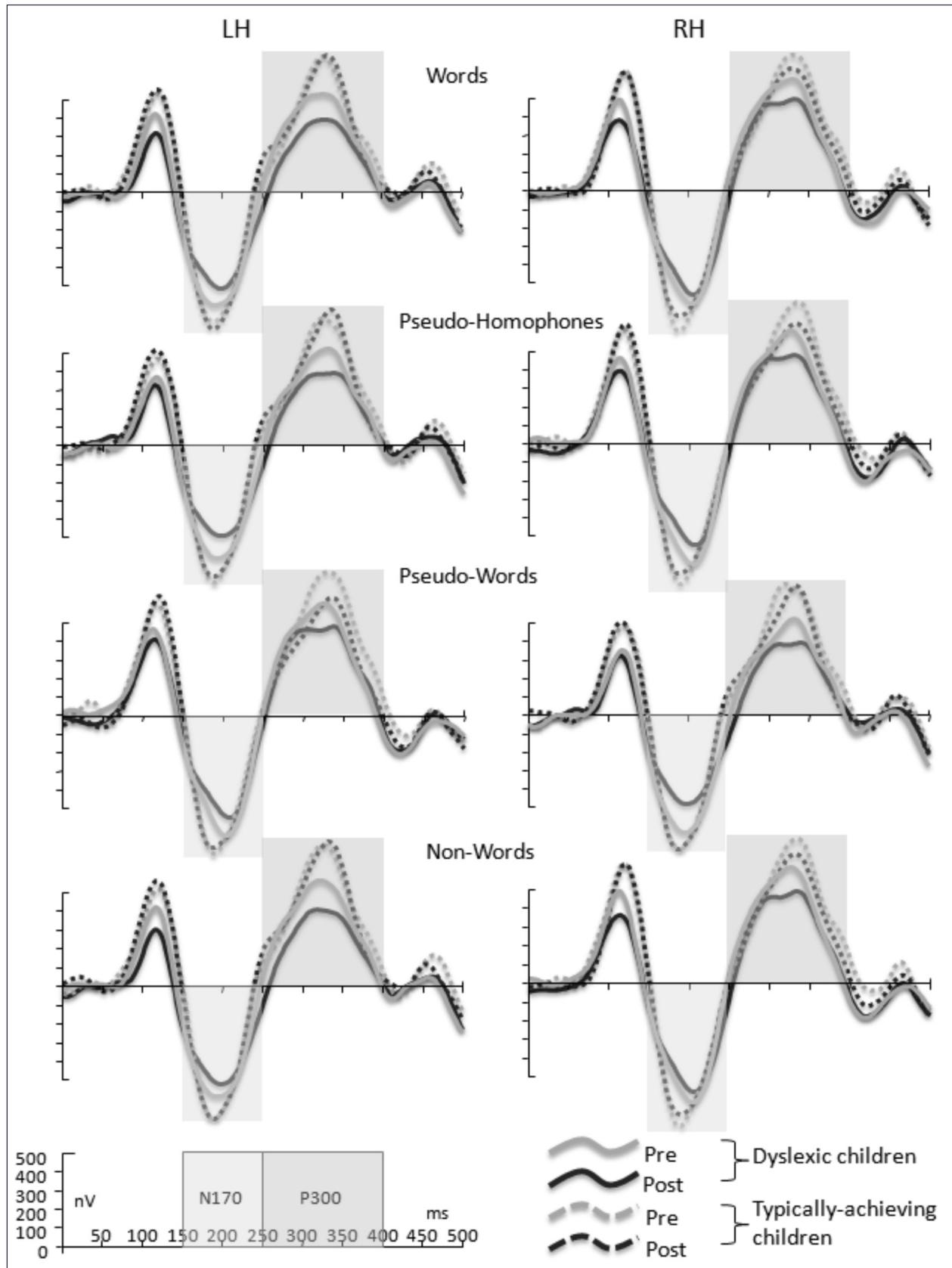
Table . Effects distribution observed between first and last session.

Figure caption

Figure 1. ERP curves obtained from the linear derivation of P7, PO9 and O1 for the left hemisphere (LH) and P8, PO10 and O2 for the right hemisphere (RH) in the different conditions of the visual lexical decision task at session 1 and 2 (pre/post) in both groups of children.

Figure

Figure 1



BIBLIOGRAPHIE

- [1] Spss for windows, rel. 16.0.0. 2007. chicago : Spss inc. URL www.spss.com. (Cited on page 115.)
- [2] O. Aaltonen, O. Eerola, A. Hellström, E. Uusipaikka, and A. H. Lang. Perceptual magnet effect in the light of behavioral and psychophysiological data. *J Acoust Soc Am*, 101(2) :1090–1105, Feb 1997. (Cited on page 125.)
- [3] P. T. Ackerman, R. A. Dykman, and D. M. Oglesby. Visual event-related potentials of dyslexic children to rhyming and nonrhyming stimuli. *J Clin Exp Neuropsychol*, 16(1) :138–154, Feb 1994. (Cited on page 34.)
- [4] John A Agnew, Courtney Dorn, and Guinevere F Eden. Effect of intensive training on auditory processing and reading skills. *Brain Lang*, 88(1) :21–25, Jan 2004. (Cited on pages 37, 54, and 96.)
- [5] Merav Ahissar. Dyslexia and the anchoring-deficit hypothesis. *Trends Cogn Sci*, 11(11) :458–465, Nov 2007. doi : 10.1016/j.tics.2007.08.015. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.tics.2007.08.015>. (Cited on pages 24 and 106.)
- [6] Merav Ahissar, Yedida Lubin, Hanna Putter-Katz, and Karen Banai. Dyslexia and the failure to form a perceptual anchor. *Nat Neurosci*, 9(12) :1558–1564, Dec 2006. doi : 10.1038/nn1800. URL <http://dx.doi.org/10.1038/nn1800>. (Cited on pages xii, 24, and 25.)
- [7] Ann W Alexander and Anne-Marie Slinger-Constant. Current status of treatments for dyslexia : critical review. *J Child Neurol*, 19(10) :744–758, Oct 2004. (Cited on pages 36 and 40.)
- [8] Sygal Amitay, Gal Ben-Yehudah, Karen Banai, and Merav Ahissar. Disabled readers suffer from visual and auditory impairments but not from a specific magnocellular deficit. *Brain*, 125(Pt 10) : 2272–2285, Oct 2002. (Cited on page 17.)
- [9] B. Ans, S. Carbonnel, and S. Valdois. A connectionist multiple-trace memory model for polysyllabic word reading. *Psychol Rev*, 105(4) :678–723, Oct 1998. (Cited on page 22.)
- [10] E. H. Aylward, T. L. Richards, V. W. Berninger, W. E. Nagy, K. M. Field, A. C. Grimme, A. L. Richards, J. B. Thomson, and S. C. Cramer. Instructional treatment associated with changes in brain activation in children with dyslexia. *Neurology*, 61(2) :212–219, Jul 2003. (Cited on pages 31, 43, 55, and 98.)
- [11] A. D. Baddely. *Working memory*. Oxford Oxfordshire New York : Clarendon Press, 1986. (Cited on page 13.)
- [12] Karen Banai and Merav Ahissar. Auditory processing deficits in dyslexia : task or stimulus related? *Cereb Cortex*, 16(12) : 1718–1728, Dec 2006. doi : 10.1093/cercor/bhj107. URL <http://dx.doi.org/10.1093/cercor/bhj107>. (Cited on page 107.)

- [13] A. D. Bannatyne. Dyslexia—a largely unrecognised problem. *Nurs Mirror Midwives J*, 122(4) :65–66, Apr 1966. (Cited on page 6.)
- [14] D. Barbier. Akoustiks, audivimedia cd-rom, paris., 2003. (Cited on page 60.)
- [15] A. Beaton. *Dyslexia, reading and the brain : a sourcebook of psychological and biological research*. Hove, 2004. (Cited on page 40.)
- [16] Christian Beaulieu, Christopher Plewes, Lori Anne Paulson, Dawne Roy, Lindsay Snook, Luis Concha, and Linda Phillips. Imaging brain connectivity in children with diverse reading ability. *Neuroimage*, 25(4) :1266–1271, May 2005. doi : 10.1016/j.neuroimage.2004.12.053. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.12.053>. (Cited on page 31.)
- [17] P. Belin, M. Zilbovicius, S. Crozier, L. Thivard, A. Fontaine, M. C. Masure, and Y. Samson. Lateralization of speech and auditory temporal processing. *J Cogn Neurosci*, 10(4) :536–540, Jul 1998. (Cited on page 56.)
- [18] A. J. Bell and T. J. Sejnowski. An information-maximization approach to blind separation and blind deconvolution. *Neural Comput*, 7(6) :1129–1159, Nov 1995. (Cited on page 86.)
- [19] I. Beller. La rééducation sémiophonique de la dyslexie développementale. *Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant.*, 29 :168–179, 1994. (Cited on page 52.)
- [20] G. Ben-Yehudah, E. Sackett, L. Malchi-Ginzberg, and M. Ahissar. Impaired temporal contrast sensitivity in dyslexics is specific to retain-and-compare paradigms. *Brain*, 124(Pt 7) :1381–1395, Jul 2001. (Cited on page 25.)
- [21] Gal Ben-Yehudah and Merav Ahissar. Sequential spatial frequency discrimination is consistently impaired among adult dyslexics. *Vision Res*, 44(10) :1047–1063, May 2004. doi : 10.1016/j.visres.2003.12.001. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.visres.2003.12.001>. (Cited on page 25.)
- [22] A. L. Benton. Developmental dyslexia : neurological aspects. *Adv Neurol*, 7 :1–47, 1975. (Cited on page 5.)
- [23] Stefan Berti, Urte Roeber, and Erich Schröger. Bottom-up influences on working memory : behavioral and electrophysiological distraction varies with distractor strength. *Exp Psychol*, 51(4) : 249–257, 2004. (Cited on page 125.)
- [24] Catherine C Best and Gerald W McRoberts. Infant perception of non-native consonant contrasts that adults assimilate in different ways. *Lang Speech*, 46(Pt 2-3) :183–216, 2003. (Cited on page 108.)
- [25] J. R. Binder, J. A. Frost, T. A. Hammeke, R. W. Cox, S. M. Rao, and T. Prieto. Human brain language areas identified by functional magnetic resonance imaging. *J Neurosci*, 17(1) :353–362, Jan 1997. (Cited on page 31.)
- [26] D. V. Bishop. Treating reading disability without reading : evaluating alternative intervention approaches. In *Paper presented at the 7th BDA International Conference, Harrogate.*, 2008. (Cited on page 40.)

- [27] D. V. Bishop, R. P. Carlyon, J. M. Deeks, and S. J. Bishop. Auditory temporal processing impairment : neither necessary nor sufficient for causing language impairment in children. *J Speech Lang Hear Res*, 42(6) :1295–1310, Dec 1999. (Cited on page 50.)
- [28] D. V M Bishop. Using mismatch negativity to study central auditory processing in developmental language and literacy impairments : where are we, and where should we be going ? *Psychol Bull*, 133(4) :651–672, Jul 2007. doi : 10.1037/0033-2909.133.4.651. URL <http://dx.doi.org/10.1037/0033-2909.133.4.651>. (Cited on pages 107, 108, 109, and 129.)
- [29] Dorothy V M Bishop. Forty years on : Uta frith’s contribution to research on autism and dyslexia, 1966-2006. *Q J Exp Psychol (Colchester)*, 61(1) :16–26, Jan 2008. doi : 10.1080/17470210701508665. URL <http://dx.doi.org/10.1080/17470210701508665>. (Cited on pages 9 and 106.)
- [30] Dorothy V M Bishop and Margaret J Snowling. Developmental dyslexia and specific language impairment : same or different ? *Psychol Bull*, 130(6) :858–886, Nov 2004. doi : 10.1037/0033-2909.130.6.858. URL <http://dx.doi.org/10.1037/0033-2909.130.6.858>. (Cited on page 12.)
- [31] Tali Bitan, James R Booth, Janet Choy, Douglas D Burman, Darren R Gitelman, and M-Marsel Mesulam. Shifts of effective connectivity within a language network during rhyming and spelling. *J Neurosci*, 25(22) :5397–5403, Jun 2005. doi : 10.1523/JNEUROSCI.0864-05.2005. URL <http://dx.doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0864-05.2005>. (Cited on page 31.)
- [32] B. A. Blachmann. *Foundations of reading acquisition and dyslexia : implications for early intervention*. Mahwah, N.J., 1997. (Cited on page 34.)
- [33] B. A. Blachmann. *Phonological Awareness*. Nawah, NJ : Erlbaum., 2000. (Cited on page 14.)
- [34] Sheila E Blumstein, Emily B Myers, and Jesse Rissman. The perception of voice onset time : an fmri investigation of phonetic category structure. *J Cogn Neurosci*, 17(9) :1353–1366, Sep 2005. doi : 10.1162/0898929054985473. URL <http://dx.doi.org/10.1162/0898929054985473>. (Cited on pages 44 and 56.)
- [35] E. Boder. Developmental dyslexia. a new diagnostic approach based on the identification of three subtypes. *J Sch Health*, 40(6) :289–290, Jun 1970. (Cited on page 9.)
- [36] E. Boder. Developmental dyslexia : a diagnostic approach based on three atypical reading-spelling patterns. *Dev Med Child Neurol*, 15(5) :663–687, Oct 1973. (Cited on pages 6 and 9.)
- [37] P. Boersma and D. Weenink. Praat software v4.5. <http://www.fon.hum.uva.nl/praat/>, 2006. (Cited on page 112.)
- [38] Milene L Bonte, Hanne Poelmans, and Leo Blomert. Deviant neurophysiological responses to phonological regularities in speech in dyslexic children. *Neuropsychologia*, 45(7) :1427–1437, Apr 2007. doi : 10.1016/j.neuropsychologia.2006.11.009. URL <http://>

- [//dx.doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.11.009](http://dx.doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.11.009). (Cited on page 34.)
- [39] James R Booth, Dong Lu, Douglas D Burman, Tai-Li Chou, Zhen Jin, Dan-Ling Peng, Lei Zhang, Guo-Sheng Ding, Yuan Deng, and Li Liu. Specialization of phonological and semantic processing in chinese word reading. *Brain Res*, 1071(1) :197–207, Feb 2006. doi : 10.1016/j.brainres.2005.11.097. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.brainres.2005.11.097>. (Cited on page 31.)
- [40] E. Borsting, W. H. Ridder, K. Dudeck, C. Kelley, L. Matsui, and J. Motoyama. The presence of a magnocellular defect depends on the type of dyslexia. *Vision Res*, 36(7) :1047–1053, Apr 1996. (Cited on page 14.)
- [41] Marie-Line Bosse, Marie Josèphe Tainturier, and Sylviane Valdois. Developmental dyslexia : the visual attention span deficit hypothesis. *Cognition*, 104(2) :198–230, Aug 2007. doi : 10.1016/j.cognition.2006.05.009. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.cognition.2006.05.009>. (Cited on pages 9, 14, 22, and 23.)
- [42] Claudine Bowyer-Crane, Margaret J Snowling, Fiona J Duff, Elizabeth Fieldsend, Julia M Carroll, Jeremy Miles, Kristina Götz, and Charles Hulme. Improving early language and literacy skills : differential effects of an oral language versus a phonology with reading intervention. *J Child Psychol Psychiatry*, 49(4) : 422–432, Apr 2008. doi : 10.1111/j.1469-7610.2007.01849.x. URL <http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-7610.2007.01849.x>. (Cited on page 34.)
- [43] L. Bradley and P. E. Bryant. Difficulties in auditory organisation as a possible cause of reading backwardness. *Nature*, 271(5647) : 746–747, Feb 1978. (Cited on page 50.)
- [44] J. Brandt and J. J. Rosen. Auditory phonemic perception in dyslexia : categorical identification and discrimination of stop consonants. *Brain Lang*, 9(2) :324–337, Mar 1980. (Cited on page 108.)
- [45] Robert Bringhurst. *The Elements of Typographic Style*. Version 2.5. Hartley & Marks, Publishers, Point Roberts, WA, USA, 2002. (Cited on page 213.)
- [46] N. Brunswick, E. McCrory, C. J. Price, C. D. Frith, and U. Frith. Explicit and implicit processing of words and pseudowords by adult developmental dyslexics : A search for wernicke’s wortschatz? *Brain*, 122 (Pt 10) :1901–1917, Oct 1999. (Cited on pages 29 and 30.)
- [47] Martha W Burton. Understanding the role of the prefrontal cortex in phonological processing. *Clin Linguist Phon*, 23(3) : 180–195, Mar 2009. doi : 10.1080/02699200802394963. URL <http://dx.doi.org/10.1080/02699200802394963>. (Cited on page 56.)
- [48] A. Castles and M. Coltheart. Varieties of developmental dyslexia. *Cognition*, 47(2) :149–180, May 1993. (Cited on pages 6, 9, and 13.)
- [49] Anne Castles and Max Coltheart. Is there a causal link from phonological awareness to success in learning to read? *Cognition*, 91(1) :77–111, Feb 2004. (Cited on page 15.)

- [50] R. Ceponiene, M. Cheour, and R. Näätänen. Interstimulus interval and auditory event-related potentials in children : evidence for multiple generators. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 108 : 345–354, Jul 1998. (Cited on pages 107 and 115.)
- [51] L. Cestnick and M. Coltheart. The relationship between language-processing and visual-processing deficits in developmental dyslexia. *Cognition*, 71(3) :231–255, Jul 1999. (Cited on pages 14 and 38.)
- [52] Yves Chaix, Jean-Michel Albaret, Céline Brassard, Emmanuel Cheuret, Pascale de Castelneau, Jacques Benesteau, Caroline Karsenty, and Jean-François Démonet. Motor impairment in dyslexia : the influence of attention disorders. *Eur J Paediatr Neurol*, 11(6) :368–374, Nov 2007. doi : 10.1016/j.ejpn.2007.03.006. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejpn.2007.03.006>. (Cited on page 13.)
- [53] M. Cheour, P. Korpilahti, O. Martynova, and A. H. Lang. Mismatch negativity and late discriminative negativity in investigating speech perception and learning in children and infants. *Audiol. Neurootol.*, 6 :2–11, 2001. (Cited on page 107.)
- [54] Stringer N. Siegel L. S. Chiappe, P. and K. Stanovich. Why the timing deficit hypothesis does not explain reading disability in adults. *Interdisciplinary Journal of Cognitive Neuroscience.*, 15 :73–107, 2002. (Cited on page 14.)
- [55] Jessica A Church, Rebecca S Coalson, Heather M Lugar, Steven E Petersen, and Bradley L Schlaggar. A developmental fmri study of reading and repetition reveals changes in phonological and visual mechanisms over age. *Cereb Cortex*, 18(9) :2054–2065, Sep 2008. doi : 10.1093/cercor/bhm228. URL <http://dx.doi.org/10.1093/cercor/bhm228>. (Cited on page 98.)
- [56] K. T. Ciesielski. Event-related potentials in children with specific visual cognitive disability. *Neuropsychologia*, 27(3) :303–313, 1989. (Cited on page 33.)
- [57] Donna Coch, Tory Hart, and Priya Mitra. Three kinds of rhymes : An erp study. *Brain Lang*, 104(3) :230–243, Mar 2008. doi : 10.1016/j.bandl.2007.06.003. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.bandl.2007.06.003>. (Cited on page 34.)
- [58] Grossi G. Coffey-Corina S. Holcomb P. J. & Neville H. J. Coch, D. A developmental investigation of erp auditory rhyming effects. *Developmental science*, 5(4) :467–489, 2002. (Cited on page 34.)
- [59] Wendy Cohen, Ann Hodson, Anne O’Hare, James Boyle, Tariq Durrani, Elspeth McCartney, Mike Matthey, Lionel Naftalin, and Jocelynne Watson. Effects of computer-based intervention through acoustically modified speech (fast forward) in severe mixed receptive-expressive language impairment : outcomes from a randomized controlled trial. *J Speech Lang Hear Res*, 48(3) : 715–729, Jun 2005. doi : 10.1044/1092-4388(2005/049). URL [http://dx.doi.org/10.1044/1092-4388\(2005/049\)](http://dx.doi.org/10.1044/1092-4388(2005/049)). (Cited on pages 61 and 96.)

- [60] A. Collignon, F. Maes, D. Delaere, D. Vandermeulen, P. Suetens, and G. Marchal. *Proc. Information Processing in Medical Imaging.*, pages 263–274. Kluwer Academic Publishers., 1995. (Cited on page 150.)
- [61] M. Coltheart, K. Rastle, C. Perry, R. Langdon, and J. Ziegler. Drc : a dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychol Rev*, 108(1) :204–256, Jan 2001. (Cited on page 6.)
- [62] D. P. Corina, T. L. Richards, S. Serafini, A. L. Richards, K. Steury, R. D. Abbott, D. R. Echelard, K. R. Maravilla, and V. W. Berninger. fmri auditory language differences between dyslexic and able reading children. *Neuroreport*, 12(6) :1195–1201, May 2001. (Cited on page 31.)
- [63] M. Critchley. Developmental dyslexia : a constitutional disorder of symbolic perception. *Res Publ Assoc Res Nerv Ment Dis*, 48 : 266–271, 1970. (Cited on page 5.)
- [64] L. Danon-Boileau and D. Barbier. *Play-On : Un logiciel d'entraînement à la lecture.* Paris, 2002. (Cited on pages 36 and 42.)
- [65] W. De Weirtdt. Speech perception and frequency discrimination in good and poor readers. *Applied psycholinguistics*, 9 :163–183, 1988. (Cited on page 108.)
- [66] P. Debray-Ritzen and B. Mélékian. *La dyslexie de l'enfant, par Pierre Debray-Ritzen et Badrig Mélékian.* Tournai, 1970. (Cited on page 5.)
- [67] M. B. Denckla and R. G. Rudel. Rapid "automatized" naming (r.a.n) : dyslexia differentiated from other learning disabilities. *Neuropsychologia*, 14(4) :471–479, 1976. (Cited on page 27.)
- [68] R. Drullman, J. M. Festen, and R. Plomp. Effect of reducing slow temporal modulations on speech reception. *J Acoust Soc Am*, 95(5 Pt 1) :2670–2680, May 1994. (Cited on page 52.)
- [69] R. Drullman, J. M. Festen, and R. Plomp. Effect of temporal envelope smearing on speech reception. *J Acoust Soc Am*, 95(2) : 1053–1064, Feb 1994. (Cited on page 52.)
- [70] F. H. Duffy and G. McAnulty. Neurophysiological heterogeneity and the definition of dyslexia : preliminary evidence for plasticity. *Neuropsychologia*, 28(6) :555–571, 1990. (Cited on page 40.)
- [71] O. Dufor, W. Serniclaes, L. Sprenger-Charolles, and J-F. Démonet. Left premotor cortex and allophonic speech perception in dyslexia : a pet study. *Neuroimage*, 46(1) :241–248, May 2009. doi : 10.1016/j.neuroimage.2009.01.035. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.01.035>. (Cited on page 128.)
- [72] Peereman R. Pallier-C. Dufour, S. and M. Radeau. Vocolex : une base de données lexicales sur les similarités phonologiques entre les mots français. *L'Année Psychologique*, 102 :725–746, 2002. (Cited on page 61.)

- [73] C. C. Duncan, J. M. Rumsey, S. M. Wilkniss, M. B. Denckla, S. D. Hamburger, and M. Odou-Potkin. Developmental dyslexia and attention dysfunction in adults : brain potential indices of information processing. *Psychophysiology*, 31(4) :386–401, Jul 1994. (Cited on page 33.)
- [74] J. F. Démonet, F. Chollet, S. Ramsay, D. Cardebat, J. L. Nespoulous, R. Wise, A. Rascol, and R. Frackowiak. The anatomy of phonological and semantic processing in normal subjects. *Brain*, 115 (Pt 6) :1753–1768, Dec 1992. (Cited on pages 29 and 31.)
- [75] J. F. Démonet, P. Celsis, A. Agniel, D. Cardebat, O. Rascol, and J. P. Marc-Vergnes. Activation of regional cerebral blood flow by a memorization task in early parkinson’s disease patients and normal subjects. *J Cereb Blood Flow Metab*, 14(3) :431–438, May 1994. (Cited on page 29.)
- [76] J.F. Démonet, M.t J Taylor, and Y. Chaix. Developmental dyslexia. *Lancet*, 363(9419) :1451–1460, May 2004. doi : 10.1016/S0140-6736(04)16106-0. URL [http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736\(04\)16106-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(04)16106-0). (Cited on pages 13, 16, 27, 30, 37, and 38.)
- [77] Jean Ecalte, Annie Magnan, Houria Bouchafa, and Jean Emile Gombert. Computer-based training with ortho-phonological units in dyslexic children : new investigations. *Dyslexia*, 15(3) :218–238, Jul 2008. doi : 10.1002/dys.373. URL <http://dx.doi.org/10.1002/dys.373>. (Cited on page 36.)
- [78] Mark A Eckert, Christiana M Leonard, Todd L Richards, Elizabeth H Aylward, Jennifer Thomson, and Virginia W Berninger. Anatomical correlates of dyslexia : frontal and cerebellar findings. *Brain*, 126(Pt 2) :482–494, Feb 2003. (Cited on page 32.)
- [79] Guinevere F Eden, Karen M Jones, Katherine Cappell, Lynn Gareau, Frank B Wood, Thomas A Zeffiro, Nicole A E Dietz, John A Agnew, and D. Lynn Flowers. Neural changes following remediation in adult developmental dyslexia. *Neuron*, 44 (3) :411–422, Oct 2004. doi : 10.1016/j.neuron.2004.10.019. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuron.2004.10.019>. (Cited on page 45.)
- [80] C. Elbro. Early linguistic abilities and reading development : A review and a hypothesis about underlying differences in distinctiveness of phonological representations of lexical items. *Reading and Writing : An Interdisciplinary Journal.*, 8 :453–485, 1997. (Cited on page 14.)
- [81] Kimberly Andrews Espy, Dennis L Molfese, Victoria J Molfese, and Arlene Modglin. Development of auditory event-related potentials in young children and relations to word-level reading abilities at age 8 years. *Ann Dyslexia*, 54(1) :9–38, Jun 2004. (Cited on page 34.)
- [82] A. Facoetti and M. Molteni. The gradient of visual attention in developmental dyslexia. *Neuropsychologia*, 39(4) :352–357, 2001. (Cited on pages 22 and 38.)

- [83] A. Facoetti, P. Paganoni, and M. L. Lorusso. The spatial distribution of visual attention in developmental dyslexia. *Exp Brain Res*, 132(4) :531–538, Jun 2000. (Cited on page 38.)
- [84] Andrea Facoetti, Maria Luisa Lorusso, Pierluigi Paganoni, Carmen Cattaneo, Raffaella Galli, and Gian Gastone Mascetti. The time course of attentional focusing in dyslexic and normally reading children. *Brain Cogn*, 53(2) :181–184, Nov 2003. (Cited on page 38.)
- [85] Andrea Facoetti, Maria Luisa Lorusso, Pierluigi Paganoni, Carmen Cattaneo, Raffaella Galli, Carlo Umiltà, and Gian Gastone Mascetti. Auditory and visual automatic attention deficits in developmental dyslexia. *Brain Res Cogn Brain Res*, 16(2) :185–191, Apr 2003. (Cited on pages 22, 38, and 39.)
- [86] Andrea Facoetti, Anna Noemi Trussardi, Milena Ruffino, Maria Luisa Lorusso, Carmen Cattaneo, Raffaella Galli, Massimo Molteni, and Marco Zorzi. Multisensory spatial attention deficits are predictive of phonological decoding skills in developmental dyslexia. *J Cogn Neurosci*, Apr 2009. doi : 10.1162/jocn.2009.21232. URL <http://dx.doi.org/10.1162/jocn.2009.21232>. (Cited on pages 13, 22, and 50.)
- [87] A. J. Fawcett and L. Lynch. Systematic identification and intervention for reading difficulty : case studies of children with eal. *Dyslexia*, 6(1) :57–71, 2000. doi : 3.0.CO;2-W. URL <http://dx.doi.org/3.0.CO;2-W>. (Cited on page 38.)
- [88] Raichle F. Miezin-S. Peterson S. Tallal P. Fiez, J. and W. Katz. Pet studies of auditory and phonological processing : effects of stimulus type and task condition. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 7 :357–375, 1995. (Cited on page 56.)
- [89] Desbarres K.-& Thibodeau L. Friel-Patti, S. Case studies of children using fast forward. *American Journal of Speech-Language Pathology*, 10 :203–215, 2001. (Cited on pages 54 and 96.)
- [90] K. J. Friston, C. D. Frith, R. S. Frackowiak, and R. Turner. Characterizing dynamic brain responses with fmri : a multivariate approach. *Neuroimage*, 2(2) :166–172, Jun 1995. (Cited on page 150.)
- [91] Cynthia H Y Fu, Anthony R McIntosh, Jieun Kim, Wilkin Chau, Edward T Bullmore, Steve C R Williams, Garry D Honey, and Philip K McGuire. Modulation of effective connectivity by cognitive demand in phonological verbal fluency. *Neuroimage*, 30(1) :266–271, Mar 2006. doi : 10.1016/j.neuroimage.2005.09.035. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.09.035>. (Cited on page 31.)
- [92] Q. J. Fu and R. V. Shannon. Effects of amplitude nonlinearity on phoneme recognition by cochlear implant users and normal-hearing listeners. *J Acoust Soc Am*, 104(5) :2570–2577, Nov 1998. (Cited on page 52.)
- [93] N. Fujimaki, S. Miyauchi, B. Pütz, Y. Sasaki, R. Takino, K. Sakai, and T. Tamada. Functional magnetic resonance imaging of

- neural activity related to orthographic, phonological, and lexico-semantic judgments of visually presented characters and words. *Hum Brain Mapp*, 8(1) :44–59, 1999. (Cited on page 31.)
- [94] N. Gaab, J. D E Gabrieli, G. K. Deutsch, P. Tallal, and E. Temple. Neural correlates of rapid auditory processing are disrupted in children with developmental dyslexia and ameliorated with training : an fmri study. *Restor Neurol Neurosci*, 25(3-4) :295–310, 2007. (Cited on pages 44 and 55.)
- [95] A. M. Galaburda. Developmental dyslexia and animal studies : at the interface between cognition and neurology. *Cognition*, 50 (1-3) :133–149, 1994. (Cited on page 21.)
- [96] A. M. Galaburda and T. L. Kemper. Cytoarchitectonic abnormalities in developmental dyslexia : a case study. *Ann Neurol*, 6(2) :94–100, Aug 1979. doi : 10.1002/ana.410060203. URL <http://dx.doi.org/10.1002/ana.410060203>. (Cited on pages 20, 27, and 28.)
- [97] A. M. Galaburda, G. F. Sherman, G. D. Rosen, F. Aboitiz, and N. Geschwind. Developmental dyslexia : four consecutive patients with cortical anomalies. *Ann Neurol*, 18(2) :222–233, Aug 1985. doi : 10.1002/ana.410180210. URL <http://dx.doi.org/10.1002/ana.410180210>. (Cited on pages 21 and 27.)
- [98] Albert M Galaburda, Joseph LoTurco, Franck Ramus, R. Holly Fitch, and Glenn D Rosen. From genes to behavior in developmental dyslexia. *Nat Neurosci*, 9(10) :1213–1217, Oct 2006. doi : 10.1038/nn1772. URL <http://dx.doi.org/10.1038/nn1772>. (Cited on page 106.)
- [99] E. Gauckler. *Le Professeur J. Dejerine*. Paris, 1922. (Cited on page 3.)
- [100] Jenna R Gelfand and Susan Y Bookheimer. Dissociating neural mechanisms of temporal sequencing and processing phonemes. *Neuron*, 38(5) :831–842, Jun 2003. (Cited on pages 44 and 56.)
- [101] D. C. Gersons-Wolfensberger and W. A. Ruijsenaars. Definition and treatment of dyslexia : a report by the committee on dyslexia of the health council of the netherlands. *J Learn Disabil*, 30(2) : 209–213, 1997. (Cited on page 5.)
- [102] Crofford-J. Gale-M. Gillam, R. and L. Hoffman. Language change following computer-assisted language instruction with fast forward. laureate learning systems software. *American Journal of Speech-Language Pathology.*, 10 :231–247, 2001. (Cited on page 54.)
- [103] Frome-Loeb D. Gillam, R. and S. Friel-Patti. Looking back : a summary of five exploratory studies of fast forward. *American Journal of Speech-Language Pathology*, 10 :269–273, 2001. (Cited on page 54.)
- [104] R. Gillam. Computer assisted language intervention using fast forward : theoretical and empirical considerations for clinical decision-making. *Language Speech and Hearing Services in Schools*, 30 :363–370, 1999. (Cited on pages 54 and 96.)

- [105] Ronald B Gillam, Diane Frome Loeb, Lvae M Hoffman, Thomas Bohman, Craig A Champlin, Linda Thibodeau, Judith Widen, Jayne Brandel, and Sandy Friel-Patti. The efficacy of fast forward language intervention in school-age children with language impairment : a randomized controlled trial. *J Speech Lang Hear Res*, 51(1) :97–119, Feb 2008. doi : 10.1044/1092-4388(2008/007). URL [http://dx.doi.org/10.1044/1092-4388\(2008/007\)](http://dx.doi.org/10.1044/1092-4388(2008/007)). (Cited on page 37.)
- [106] K. Giraud, J. F. Démonet, M. Habib, P. Marquis, P. Chauvel, and C. Liégeois-Chauvel. Auditory evoked potential patterns to voiced and voiceless speech sounds in adult developmental dyslexics with persistent deficits. *Cereb Cortex*, 15(10) : 1524–1534, Oct 2005. doi : 10.1093/cercor/bhi031. URL <http://dx.doi.org/10.1093/cercor/bhi031>. (Cited on page 107.)
- [107] K. Giraud, A. Trébuchon-DaFonseca, J. F. Démonet, M. Habib, and C. Liégeois-Chauvel. Asymmetry of voice onset time-processing in adult developmental dyslexics. *Clin Neurophysiol*, 119(7) :1652–1663, Jul 2008. doi : 10.1016/j.clinph.2008.02.017. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.clinph.2008.02.017>. (Cited on pages 107 and 129.)
- [108] J. J. Godfrey, A. K. Syrdal-Lasky, K. K. Millay, and C. M. Knox. Performance of dyslexic children on speech perception tests. *J Exp Child Psychol*, 32(3) :401–424, Dec 1981. (Cited on page 26.)
- [109] L. Gootjes, T. Raij, R. Salmelin, and R. Hari. Left-hemisphere dominance for processing of vowels : a whole-scalp neuromagnetic study. *Neuroreport*, 10(14) :2987–2991, Sep 1999. (Cited on page 125.)
- [110] Usha Goswami, Jennifer Thomson, Ulla Richardson, Rhona Stainthorpe, Diana Hughes, Stuart Rosen, and Sophie K Scott. Amplitude envelope onsets and developmental dyslexia : A new hypothesis. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 99(16) :10911–10916, Aug 2002. doi : 10.1073/pnas.122368599. URL <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.122368599>. (Cited on pages 26, 53, and 128.)
- [111] E. L. Grigorenko. Developmental dyslexia : an update on genes, brains, and environments. *J Child Psychol Psychiatry*, 42(1) :91–125, Jan 2001. (Cited on pages 6 and 12.)
- [112] G. Grossi, D. Coch, S. Coffey-Corina, P. J. Holcomb, and H. J. Neville. Phonological processing in visual rhyming : a developmental erp study. *J Cogn Neurosci*, 13(5) :610–625, Jul 2001. doi : 10.1162/089892901750363190. URL <http://dx.doi.org/10.1162/089892901750363190>. (Cited on page 34.)
- [113] Kremin H. and Delatolas G . *Approche cognitive des troubles de la lecture et de l'écriture chez l'enfant et l'adulte*, chapter Les prérequis cognitifs de l'apprentissage de la lecture., pages 96–113. Marseille : Solal., 1996. (Cited on page 57.)
- [114] Espesser-R. Rey-V. Giraud K. Bruas P. Habib, M. and C. Gres. Training dyslexics with acoustically modified speech : evidence of improved phonological performance. *Brain & Cognition*, 40 : 143–146, 1999. (Cited on page 42.)

- [115] M. Habib. *La dyslexie à livre ouvert*. Marseille, 2003. (Cited on pages 12 and 13.)
- [116] Michel Habib, Véronique Rey, Virginie Daffaure, Roselyne Camps, Robert Espesser, Barbara Joly-Pottuz, and Jean-François Démonet. Phonological training in children with dyslexia using temporally modified speech : a three-step pilot investigation. *Int J Lang Commun Disord*, 37(3) :289–308, 2002. doi : 10.1080/13682820210136278. URL <http://dx.doi.org/10.1080/13682820210136278>. (Cited on pages 38, 42, 50, 51, 54, 62, and 96.)
- [117] Peter Hagoort. On broca, brain, and binding : a new framework. *Trends Cogn Sci*, 9(9) :416–423, Sep 2005. doi : 10.1016/j.tics.2005.07.004. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.tics.2005.07.004>. (Cited on page 99.)
- [118] Michelle Hampson, Bradley S Peterson, Pawel Skudlarski, James C Gatenby, and John C Gore. Detection of functional connectivity using temporal correlations in mr images. *Hum Brain Mapp*, 15(4) :247–262, Apr 2002. (Cited on page 31.)
- [119] R. Hari, H. Renvall, and T. Tanskanen. Left minineglect in dyslexic adults. *Brain*, 124(Pt 7) :1373–1380, Jul 2001. (Cited on page 22.)
- [120] Riitta Hari and Hanna Renvall. Impaired processing of rapid stimulus sequences in dyslexia. *Trends Cogn Sci*, 5(12) :525–532, Dec 2001. (Cited on page 38.)
- [121] J.D. Harris. Discrimination of pitch : suggestions toward method and procedure. *Am. J. Psychol.*, 61 :309–322, 1948. (Cited on page 24.)
- [122] Douglas E H Hartley and David R Moore. Auditory processing efficiency deficits in children with developmental language impairments. *J Acoust Soc Am*, 112(6) :2962–2966, Dec 2002. (Cited on page 24.)
- [123] Erin A Hayes, Catherine M Warrier, Trent G Nicol, Steven G Zecker, and Nina Kraus. Neural plasticity following auditory training in children with learning problems. *Clin Neurophysiol*, 114(4) :673–684, Apr 2003. (Cited on pages 41 and 42.)
- [124] P. Helenius, A. Tarkiainen, P. Cornelissen, P. C. Hansen, and R. Salmelin. Dissociation of normal feature analysis and deficient processing of letter-strings in dyslexic adults. *Cereb Cortex*, 9(5) :476–483, 1999. (Cited on pages 32 and 33.)
- [125] J. Hinshelwood. *Congenital Word-Blindness*. London, 1917. (Cited on page 3.)
- [126] Connie Suk-Han Ho, David Wai-Ock Chan, Suk-Han Lee, Suk-Man Tsang, and Vivian Hui Luan. Cognitive profiling and preliminary subtyping in chinese developmental dyslexia. *Cognition*, 91(1) :43–75, Feb 2004. (Cited on page 11.)
- [127] I.J. Hochmair, E.S. & Hochmair-Desoyer. *Cochlear Implants*, chapter Aspects of sound signal processing using the Vienna intra- and extracochlear implants, pages 101–110. Raven Press, 1984. (Cited on page 52.)

- [128] Fumiko Hoeft, Ann Meyler, Arvel Hernandez, Connie Juel, Heather Taylor-Hill, Jennifer L Martindale, Glenn McMillon, Galena Kolchugina, Jessica M Black, Afrooz Faizi, Gayle K Deutsch, Wai Ting Siok, Allan L Reiss, Susan Whitfield-Gabrieli, and John D E Gabrieli. Functional and morphometric brain dissociation between dyslexia and reading ability. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 104(10) :4234–4239, Mar 2007. doi : 10.1073/pnas.0609399104. URL <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0609399104>. (Cited on page 31.)
- [129] Macaruso P. Hook, PE. and S. Jones. Efficacy of fast forward training on facilitating acquisition of reading skills by children with reading difficulties Ő a longitudinal study. *Annals of Dyslexia.*, 51 :75–96, 2001. (Cited on pages 54 and 96.)
- [130] B. Horwitz, J. M. Rumsey, and B. C. Donohue. Functional connectivity of the angular gyrus in normal reading and dyslexia. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 95(15) :8939–8944, Jul 1998. (Cited on pages 29 and 31.)
- [131] Z. Hou and C. V. Pavlovic. Effects of temporal smearing on temporal resolution, frequency selectivity, and speech intelligibility. *J Acoust Soc Am*, 96(3) :1325–1340, Sep 1994. (Cited on page 52.)
- [132] T. Houtgast and H.J.M. Steeneken. A review of the mtf concept in room acoustics and its use for estimating speech intelligibility in auditoria. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 77 : 1069–1077, 1985. (Cited on page 52.)
- [133] Paul Iverson, Patricia K Kuhl, Reiko Akahane-Yamada, Eugen Diesch, Yoh'ich Tohkura, Andreas Kettermann, and Claudia Siebert. A perceptual interference account of acquisition difficulties for non-native phonemes. *Cognition*, 87(1) :B47–B57, Feb 2003. (Cited on page 108.)
- [134] S. Casalis M. P. Lemaître J. M. Cuisset A. Platof J. C. Cuvellier, F. Pandit and L. Vallée. [a study of 100 consecutive children presenting with learning disabilities]. *Arch Pediatr*, 11(3) :201–206, Mar 2004. doi : 10.1016/j.arcped.2003.12.004. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.arcped.2003.12.004>. (Cited on page 13.)
- [135] Valdois S. & Zorman M. Jacquier-Roux, M. Odedys : un outil de dépistage des dyslexies. version 2. *Grenoble : Laboratoire cognisciences, IUFM de Grenoble.*, 2002. (Cited on page 111.)
- [136] I. H. Jenkins, D. J. Brooks, P. D. Nixon, R. S. Frackowiak, and R. E. Passingham. Motor sequence learning : a study with positron emission tomography. *J Neurosci*, 14(6) :3775–3790, Jun 1994. (Cited on page 30.)
- [137] Marc F Joanisse and Joseph S Gati. Overlapping neural regions for processing rapid temporal cues in speech and nonspeech signals. *Neuroimage*, 19(1) :64–79, May 2003. (Cited on pages 44 and 56.)
- [138] Mélanie Jucla. *Aspects phonologiques, orthographiques et lexico-sémantiques du traitement du langage : production orale versus écrite*

chez l'adulte et protocole d'intervention dans les dyslexies du développement - études comportementales et par la méthode des potentiels évoqués. PhD thesis, Université Toulouse II Le Mirail, 2009. (Cited on pages xvi and 131.)

- [139] P. W. Jusczyk, D. M. Houston, and M. Newsome. The beginnings of word segmentation in english-learning infants. *Cogn Psychol*, 39(3-4) :159–207, 1999. doi : 10.1006/cogp.1999.0716. URL <http://dx.doi.org/10.1006/cogp.1999.0716>. (Cited on page 52.)
- [140] Kandel. *Principles of neural science(5th ed.)*. N.Y., 2005. (Cited on page 20.)
- [141] C. Kirtley, P. Bryant, M. MacLean, and L. Bradley. Rhyme, rime, and the onset of reading. *J Exp Child Psychol*, 48(2) :224–245, Oct 1989. (Cited on page 50.)
- [142] N. Kraus, T. J. McGee, T. D. Carrell, S. G. Zecker, T. G. Nicol, and D. B. Koch. Auditory neurophysiologic responses and discrimination deficits in children with learning problems. *Science*, 273(5277) :971–973, Aug 1996. (Cited on pages 33 and 107.)
- [143] Martin Kronbichler, Florian Hutzler, and Heinz Wimmer. Dyslexia : verbal impairments in the absence of magnocellular impairments. *Neuroreport*, 13(5) :617–620, Apr 2002. (Cited on page 14.)
- [144] P. K. Kuhl. Learning and representation in speech and language. *Curr Opin Neurobiol*, 4(6) :812–822, Dec 1994. (Cited on page 108.)
- [145] P. K. Kuhl. A new view of language acquisition. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 97(22) :11850–11857, Oct 2000. doi : 10.1073/pnas.97.22.11850. URL <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.97.22.11850>. (Cited on page 108.)
- [146] Patricia K Kuhl. Early language acquisition : cracking the speech code. *Nat Rev Neurosci*, 5(11) :831–843, Nov 2004. doi : 10.1038/nrn1533. URL <http://dx.doi.org/10.1038/nrn1533>. (Cited on page 126.)
- [147] T. Kujala and R. Näätänen. The mismatch negativity in evaluating central auditory dysfunction in dyslexia. *Neurosci Biobehav Rev*, 25 :535–543, Aug 2001. (Cited on page 33.)
- [148] T. Kujala, K. Myllyviita, M. Tervaniemi, K. Alho, J. Kallio, and R. Näätänen. Basic auditory dysfunction in dyslexia as demonstrated by brain activity measurements. *Psychophysiology*, 37(2) :262–266, Mar 2000. (Cited on page 16.)
- [149] T. Kujala, K. Karma, R. Ceponiene, S. Belitz, P. Turkkila, M. Tervaniemi, and R. Näätänen. Plastic neural changes and reading improvement caused by audiovisual training in reading-impaired children. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 98(18) :10509–10514, Aug 2001. doi : 10.1073/pnas.181589198. URL <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.181589198>. (Cited on page 41.)
- [150] Vincent Labatut, Josette Pastor, Serge Ruff, Jean-François Démonet, and Pierre Celsis. Cerebral modeling and dynamic bayesian networks. *Artif Intell Med*, 30(2) :119–139, Feb 2004. (Cited on page 27.)

- [151] J. P. Larsen, T. Høien, I. Lundberg, and H. Odegaard. Mri evaluation of the size and symmetry of the planum temporale in adolescents with developmental dyslexia. *Brain Lang*, 39(2) : 289–301, Aug 1990. (Cited on page 28.)
- [152] P. Lecoq. *E.C.O.S.S.E. Une épreuve de compréhension syntaxico-sémantique*. Lille :Presses Universitaires du Septentrion, 1996. (Cited on page 57.)
- [153] P. Lefavrais. Description, définition et mesure de la dyslexie. Utilisation du test L'Alouette. *Revue de Psychologie Appliquée*, 15 : 33–44, 1967. (Cited on pages 6, 57, and 111.)
- [154] C. M. Leonard, M. A. Eckert, L. J. Lombardino, T. Oakland, J. Kranzler, C. M. Mohr, W. M. King, and A. Freeman. Anatomical risk factors for phonological dyslexia. *Cereb Cortex*, 11(2) : 148–157, Feb 2001. (Cited on page 28.)
- [155] P. H. Leppänen and H. Lyytinen. Auditory event-related potentials in the study of developmental language-related disorders. *Audiol Neurootol*, 2(5) :308–340, 1997. (Cited on page 33.)
- [156] A. M. Liberman and I. G. Mattingly. The motor theory of speech perception revised. *Cognition*, 21(1) :1–36, Oct 1985. (Cited on page 23.)
- [157] A. M. Liberman, K. S. Harris, H. S. Hoffman, and B. C. Griffiths. The discrimination of speech sounds within and across phoneme boundaries. *J Exp Psychol*, 54(5) :358–368, Nov 1957. (Cited on page 18.)
- [158] I. Y. Liberman and D. Shankweiler. *Speech, the alphabet and teaching to read*. Hillsdale, N.J : Erlbaum., 1979. (Cited on page 14.)
- [159] I. Y. Liberman and D. Shankweiler. *Learning to read : basic research and its implications*, chapter Phonology and beginning reading - a tutorial., pages 3–17. Hillsdale, N.J. : Erlbaum., 1991. (Cited on page 14.)
- [160] I. Y. Liberman, V. A. Mann, D. Shankweiler, and M. Werfelman. Children's memory for recurring linguistic and nonlinguistic material in relation to reading ability. *Cortex*, 18(3) :367–375, Oct 1982. (Cited on page 15.)
- [161] P. Lloyd and J. Nicholson. Lexiphone therapy : an auditory intervention approach treating dyslexia. *Dyslexia r=Review*, 14 : 18–22, 2003. (Cited on page 53.)
- [162] Diane Frome Loeb, Ronald B Gillam, Lavae Hoffman, Jayne Brandel, and Janet Marquis. The effects of fast forward-language on the phonemic awareness and reading skills of school-age children with language impairments and poor reading skills. *Am J Speech Lang Pathol*, Jun 2009. doi : 10.1044/1058-0360(2009/08-0067). URL [http://dx.doi.org/10.1044/1058-0360\(2009/08-0067\)](http://dx.doi.org/10.1044/1058-0360(2009/08-0067)). (Cited on page 37.)
- [163] C. Lorenzi, A. Dumont, and C. Füllgrabe. Use of temporal envelope cues by children with developmental dyslexia. *J Speech Lang Hear Res*, 43(6) :1367–1379, Dec 2000. (Cited on page 53.)

- [164] Maria Luisa Lorusso, Andrea Facchetti, Alessio Toraldo, and Massimo Molteni. Tachistoscopic treatment of dyslexia changes the distribution of visual-spatial attention. *Brain Cogn*, 57(2) : 135–142, Mar 2005. doi : 10.1016/j.bandc.2004.08.057. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.bandc.2004.08.057>. (Cited on page 38.)
- [165] Maria Luisa Lorusso, Andrea Facchetti, Pierluigi Paganoni, Marco Pezzani, and Massimo Molteni. Effects of visual hemisphere-specific stimulation versus reading-focused training in dyslexic children. *Neuropsychol Rehabil*, 16(2) :194–212, Apr 2006. doi : 10.1080/09602010500145620. URL <http://dx.doi.org/10.1080/09602010500145620>. (Cited on pages 38 and 39.)
- [166] Borden S. L. DeLuca T. Lacerenza L. Benson N. J. Lovett, M. W. and D. Brackstone. Treating the core deficits of developmental dyslexia : evidence of transfer of learning after phonologically- and strategy-based reading training programs. *Developmental Psychology*, 30 :805–822, 1994. (Cited on pages 36 and 54.)
- [167] Lacerenza L. Lovett, M. W. and S. L. Borden. Putting struggling readers on the phast track : a program to integrate phonological and strategy-based remedial reading instruction and maximize outcomes. *J Learn Disabil*, 33(5) :458–476, 2000. (Cited on page 36.)
- [168] M. W. Lovett, M. J. Ransby, and R. W. Barron. Treatment, subtype, and word type effects in dyslexic children’s response to remediation. *Brain Lang*, 34(2) :328–349, Jul 1988. (Cited on page 36.)
- [169] M. W. Lovett, M. J. Ransby, N. Hardwick, M. S. Johns, and S. A. Donaldson. Can dyslexia be treated? treatment-specific and generalized treatment effects in dyslexic children’s response to remediation. *Brain Lang*, 37(1) :90–121, Jul 1989. (Cited on pages 35 and 36.)
- [170] M. W. Lovett, L. Lacerenza, and S. L. Borden. Putting struggling readers on the phast track : a program to integrate phonological and strategy-based remedial reading instruction and maximize outcomes. *J Learn Disabil*, 33(5) :458–476, 2000. (Cited on pages 36 and 40.)
- [171] D. Lovrich, J. C. Cheng, and D. M. Velting. Late cognitive brain potentials, phonological and semantic classification of spoken words, and reading ability in children. *J Clin Exp Neuropsychol*, 18 (2) :161–177, Apr 1996. (Cited on page 34.)
- [172] D. Lovrich, J. C. Cheng, D. M. Velting, and V. Kazmerski. Auditory erps during rhyme and semantic processing : effects of reading ability in college students. *J Clin Exp Neuropsychol*, 19(3) :313–330, Jun 1997. (Cited on page 34.)
- [173] Deborah Lovrich, Jeff Cheng, and Drew Velting. Erp correlates of form and rhyme letter tasks in impaired reading children : a critical evaluation. *Child Neuropsychol*, 9(3) :159–174, Sep 2003. (Cited on page 34.)
- [174] M. J. Lowe, B. J. Mock, and J. A. Sorenson. Functional connectivity in single and multislice echoplanar imaging using resting-state

- fluctuations. *Neuroimage*, 7(2) :119–132, Feb 1998. doi : 10.1006/nimg.1997.0315. URL <http://dx.doi.org/10.1006/nimg.1997.0315>. (Cited on page 31.)
- [175] H. Lyytinen, A. P. Blomberg, and R. Näätänen. Event-related potentials and autonomic responses to a change in unattended auditory stimuli. *Psychophysiology*, 29 :523–534, Sep 1992. (Cited on page 107.)
- [176] A. Magnan and J. Ecalte. Audio-visual training in children with reading disabilities. *Computers & Education*, 46(4) :407–425, 2006. (Cited on page 36.)
- [177] Annie Magnan, Jean Ecalte, Evelyne Veuillet, and Lionel Collet. The effects of an audio-visual training program in dyslexic children. *Dyslexia*, 10(2) :131–140, May 2004. doi : 10.1002/dys.270. URL <http://dx.doi.org/10.1002/dys.270>. (Cited on pages 36 and 51.)
- [178] Steve Majerus, Martial Van der Linden, Fabienne Collette, Steve Laureys, Martine Poncelet, Christian Degueldre, Guy Delfiore, André Luxen, and Eric Salmon. Modulation of brain activity during phonological familiarization. *Brain Lang*, 92(3) :320–331, Mar 2005. doi : 10.1016/j.bandl.2004.07.003. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.bandl.2004.07.003>. (Cited on page 31.)
- [179] & Keating P. Manis, F.R. *The connections between language and reading disabilities.*, chapter Speech perception in dyslexic children with and without language impairments. Mahwah, N.J : Lawrence Erlbaum, 2004. (Cited on page 108.)
- [180] F. R. Manis, M. S. Seidenberg, L. M. Doi, C. McBride-Chang, and A. Petersen. On the bases of two subtypes of developmental [corrected] dyslexia. *Cognition*, 58(2) :157–195, Feb 1996. (Cited on pages 10 and 13.)
- [181] V. A. Mann, I. Y. Liberman, and D. Shankweiler. Children’s memory for sentences and word strings in relation to reading ability. *Mem Cognit*, 8(4) :329–335, Jul 1980. (Cited on page 15.)
- [182] B. A. Martin, V. L. Shafer, M. L. Morr, J. A. Kreuzer, and D. Kurtzberg. Maturation of mismatch negativity : a scalp current density analysis. *Ear Hear*, 24 :463–471, Dec 2003. (Cited on page 107.)
- [183] Gian Marco Marzocchi, Sara Ornaghi, and Sara Barboglio. What are the causes of the attention deficits observed in children with dyslexia? *Child Neuropsychol*, pages 1–15, Mar 2009. doi : 10.1080/09297040902740660. URL <http://dx.doi.org/10.1080/09297040902740660>. (Cited on page 50.)
- [184] Urs Maurer, Silvia Brem, Kerstin Bucher, Felicitas Kranz, Rosmarie Benz, Hans-Christoph Steinhausen, and Daniel Brandeis. Impaired tuning of a fast occipito-temporal response for print in dyslexic children learning to read. *Brain*, 130(Pt 12) :3200–3210, Dec 2007. doi : 10.1093/brain/awm193. URL <http://dx.doi.org/10.1093/brain/awm193>. (Cited on page 32.)

- [185] G. M. McArthur and D. V. Bishop. Auditory perceptual processing in people with reading and oral language impairments : current issues and recommendations. *Dyslexia*, 7(3) :150–170, 2001. doi : 10.1002/dys.200. URL <http://dx.doi.org/10.1002/dys.200>. (Cited on page 106.)
- [186] S. McDougall, C. Hulme, A. Ellis, and A. Monk. Learning to read : the role of short-term memory and phonological skills. *J Exp Child Psychol*, 58(1) :112–133, Aug 1994. doi : 10.1006/jecp.1994.1028. URL <http://dx.doi.org/10.1006/jecp.1994.1028>. (Cited on page 15.)
- [187] W. B. McPherson, P. T. Ackerman, P. J. Holcomb, and R. A. Dykman. Event-related brain potentials elicited during phonological processing differentiate subgroups of reading disabled adolescents. *Brain Lang*, 62(2) :163–185, Apr 1998. doi : 10.1006/brln.1997.1893. URL <http://dx.doi.org/10.1006/brln.1997.1893>. (Cited on page 34.)
- [188] M. McPhillips, P. G. Hepper, and G. Mulhern. Effects of replicating primary-reflex movements on specific reading difficulties in children : a randomised, double-blind, controlled trial. *Lancet*, 355(9203) :537–541, Feb 2000. (Cited on page 39.)
- [189] Martin McPhillips and Julie-Anne Jordan-Black. The effect of social disadvantage on motor development in young children : a comparative study. *J Child Psychol Psychiatry*, 48(12) :1214–1222, Dec 2007. doi : 10.1111/j.1469-7610.2007.01814.x. URL <http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-7610.2007.01814.x>. (Cited on page 39.)
- [190] M. M. Merzenich, W. M. Jenkins, P. Johnston, C. Schreiner, S. L. Miller, and P. Tallal. Temporal processing deficits of language-learning impaired children ameliorated by training. *Science*, 271 (5245) :77–81, Jan 1996. (Cited on pages 38, 40, 51, and 60.)
- [191] Boitel-A. Chesneau C. Flohic C. Genot-Delbecque M. Goetgheluck C. Kerbouci N. & Kitmacher L. Messerschmitt, P. Etude comparative de la méthode sémiophonique et l'orthophonie traditionnelle chez quarante dyslexiques. *Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant*, 26 :17–24, 1994. (Cited on pages 53 and 97.)
- [192] J. O. Mitterer. There are at least two kinds of poor readers : whole-word poor readers and recoding poor readers. *Can J Psychol*, 36 (3) :445–461, Sep 1982. (Cited on page 6.)
- [193] M. Mody, M. Studdert-Kennedy, and S. Brady. Speech perception deficits in poor readers : auditory processing or phonological coding? *J Exp Child Psychol*, 64 :199–231, Feb 1997. (Cited on page 17.)
- [194] David R Moore, Joy F Rosenberg, and John S Coleman. Discrimination training of phonemic contrasts enhances phonological processing in mainstream school children. *Brain Lang*, 94 (1) :72–85, Jul 2005. doi : 10.1016/j.bandl.2004.11.009. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.bandl.2004.11.009>. (Cited on page 37.)

- [195] Sylvain Moreno, Carlos Marques, Andreia Santos, Manuela Santos, São Luís Castro, and Mireille Besson. Musical training influences linguistic abilities in 8-year-old children : more evidence for brain plasticity. *Cereb Cortex*, 19(3) :712–723, Mar 2009. doi : 10.1093/cercor/bhn120. URL <http://dx.doi.org/10.1093/cercor/bhn120>. (Cited on page 42.)
- [196] R. D. Morris, B. A. Shaywitz, D. P. Shanweiler, L. Katz, K. K. Stuebing, and J. M. Fletcher. Subtypes of reading disability : Variability around a phonological core. *Journal of Educational Psychology*, 90(3) :387–397, 1998. (Cited on page 11.)
- [197] Leybaert-J. Alegria J. Content A. Mousty, P. and J. Morais. *Evaluer les troubles de la lecture : les nouveaux modèles théoriques et leurs implications diagnostiques.*, chapter Batterie d’Evaluation du Langage écrit et de ses troubles., pages 127–145. Bruxelles : De Boeck-Université, 1994. (Cited on page 59.)
- [198] Mathilde Muneaux, Johannes C Ziegler, Catherine Truc, Jennifer Thomson, and Usha Goswami. Deficits in beat perception and dyslexia : evidence from french. *Neuroreport*, 15(8) :1255–1259, Jun 2004. (Cited on page 53.)
- [199] H. R. Myklebust. Identification and diagnosis of children with learning disabilities : an interdisciplinary study of criteria. *Semin Psychiatry*, 5(1) :55–77, Feb 1973. (Cited on page 6.)
- [200] S. E. Nadeau. Impaired grammar with normal fluency and phonology. implications for broca’s aphasia. *Brain*, 111 (Pt 5) :1111–1137, Oct 1988. (Cited on pages 31 and 99.)
- [201] Wang X. Merzenich M. M. Schreiner-C. E. Johnston P. Jenkins W. M. Nagarajan, S. S. Speech modifications algorithms used for training language learning-impaired children. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering.*, 6 :257–268, 1998. (Cited on page 60.)
- [202] Iakimova I. Bertoncini J. Frédonie S. Nazzi, T. and C. Alcantara. Early segmentation of fluent speech by infants acquiring french : emerging evidence for crosslinguistic differences. *Journal of Memory and Language*, 54 :283–299, 2006. (Cited on page 52.)
- [203] Rochelle Newman, Nan Bernstein Ratner, Ann Marie Jusczyk, Peter W Jusczyk, and Kathy Ayala Dow. Infants’ early ability to segment the conversational speech signal predicts later language development : a retrospective analysis. *Dev Psychol*, 42(4) :643–655, Jul 2006. doi : 10.1037/0012-1649.42.4.643. URL <http://dx.doi.org/10.1037/0012-1649.42.4.643>. (Cited on page 52.)
- [204] R. Nicolson, A. J. Fawcett, and P. Dean. Dyslexia, development and the cerebellum. *Trends Neurosci*, 24(9) :515–516, Sep 2001. (Cited on page 23.)
- [205] R. I. Nicolson and A. J. Fawcett. Developmental dyslexia, learning and the cerebellum. *J Neural Transm Suppl*, (69) :19–36, 2005. (Cited on page 23.)
- [206] R. I. Nicolson, A. J. Fawcett, E. L. Berry, I. H. Jenkins, P. Dean, and D. J. Brooks. Association of abnormal cerebellar activation with motor learning difficulties in dyslexic adults. *Lancet*, 353

- (9165) :1662–1667, May 1999. doi : 10.1016/S0140-6736(98)09165-X. URL [http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736\(98\)09165-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(98)09165-X). (Cited on pages 23 and 30.)
- [207] R. I. Nicolson, A. J. Fawcett, and P. Dean. Developmental dyslexia : the cerebellar deficit hypothesis. *Trends Neurosci*, 24(9) :508–511, Sep 2001. (Cited on page 30.)
- [208] R. Näätänen, M. Simpson, and N. E. Loveless. Stimulus deviance and evoked potentials. *Biol Psychol*, 14(1-2) :53–98, 1982. (Cited on page 125.)
- [209] R. Näätänen, A. Lehtokoski, M. Lennes, M. Cheour, M. Huotilainen, A. Iivonen, M. Vainio, P. Alku, R. J. Ilmoniemi, A. Luuk, J. Allik, J. Sinkkonen, and K. Alho. Language-specific phoneme representations revealed by electric and magnetic brain responses. *Nature*, 385(6615) :432–434, Jan 1997. doi : 10.1038/385432a0. URL <http://dx.doi.org/10.1038/385432a0>. (Cited on pages 107 and 125.)
- [210] R. Näätänen, P. Paavilainen, T. Rinne, and K. Alho. The mismatch negativity (MMN) in basic research of central auditory processing : a review. *Clin Neurophysiol*, 118 :2544–2590, Dec 2007. (Cited on pages 33 and 107.)
- [211] Jonas Obleser, Frank Eisner, and Sonja A Kotz. Bilateral speech comprehension reflects differential sensitivity to spectral and temporal features. *J Neurosci*, 28(32) :8116–8123, Aug 2008. doi : 10.1523/JNEUROSCI.1290-08.2008. URL <http://dx.doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1290-08.2008>. (Cited on page 129.)
- [212] T. E. O’Shaughnessy and H. L. Swanson. A comparison of two reading interventions for children with reading disabilities. *J Learn Disabil*, 33(3) :257–277, 2000. (Cited on page 35.)
- [213] Satu Pakarinen, Rika Takegata, Teemu Rinne, Minna Huotilainen, and Risto Näätänen. Measurement of extensive auditory discrimination profiles using the mismatch negativity (mmn) of the auditory event-related potential (erp). *Clin Neurophysiol*, 118 (1) :177–185, Jan 2007. doi : 10.1016/j.clinph.2006.09.001. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.clinph.2006.09.001>. (Cited on page 125.)
- [214] Charalabos Papageorgiou, Dimitris Anagnostopoulos, Giorgos A Giannakakis, Katerina Sakelariou, Nikolaos Tsiaparas, Polyxeni Paraskevopoulou, Konstantina S Nikita, Andreas Rabavilas, and Constantin Soldatos. Preattentive deficits in developmental disorders of scholastic skills. *Neuroreport*, 16(16) :1829–1832, Nov 2005. (Cited on page 100.)
- [215] Isabella Paul, Christof Bott, Sabine Heim, Christian Wienbruch, and Thomas R Elbert. Phonological but not auditory discrimination is impaired in dyslexia. *Eur J Neurosci*, 24(10) :2945–2953, Nov 2006. doi : 10.1111/j.1460-9568.2006.05153.x. URL <http://dx.doi.org/10.1111/j.1460-9568.2006.05153.x>. (Cited on page 14.)

- [216] E. Paulesu, C. D. Frith, and R. S. Frackowiak. The neural correlates of the verbal component of working memory. *Nature*, 362(6418) : 342–345, Mar 1993. doi : 10.1038/362342a0. URL <http://dx.doi.org/10.1038/362342a0>. (Cited on page 29.)
- [217] E. Paulesu, U. Frith, M. Snowling, A. Gallagher, J. Morton, R. S. Frackowiak, and C. D. Frith. Is developmental dyslexia a disconnection syndrome? evidence from pet scanning. *Brain*, 119 (Pt 1) :143–157, Feb 1996. (Cited on page 29.)
- [218] E. Paulesu, J. F. Démonet, F. Fazio, E. McCrory, V. Chanoine, N. Brunswick, S. F. Cappa, G. Cossu, M. Habib, C. D. Frith, and U. Frith. Dyslexia : cultural diversity and biological unity. *Science*, 291(5511) :2165–2167, Mar 2001. doi : 10.1126/science.1057179. URL <http://dx.doi.org/10.1126/science.1057179>. (Cited on page 29.)
- [219] Cyril Pernet, Jesper Andersson, Eraldo Paulesu, and Jean Francois Demonet. When all hypotheses are right : a multifocal account of dyslexia. *Hum Brain Mapp*, 30(7) :2278–2292, Jul 2009. doi : 10.1002/hbm.20670. URL <http://dx.doi.org/10.1002/hbm.20670>. (Cited on page 28.)
- [220] M. Petrides, B. Alivisatos, E. Meyer, and A. C. Evans. Functional activation of the human frontal cortex during the performance of verbal working memory tasks. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 90(3) : 878–882, Feb 1993. (Cited on page 99.)
- [221] T. W. Picton, C. Alain, L. Otten, W. Ritter, and A. Achim. Mismatch negativity : different water in the same river. *Audiol. Neurootol.*, 5 :111–139, 2000. (Cited on page 107.)
- [222] T. W. Picton, S. Bentin, P. Berg, E. Donchin, S. A. Hillyard, R. Johnson, G. A. Miller, W. Ritter, D. S. Ruchkin, M. D. Rugg, and M. J. Taylor. Guidelines for using human event-related potentials to study cognition : recording standards and publication criteria. *Psychophysiology*, 37(2) :127–152, Mar 2000. (Cited on pages 156 and 157.)
- [223] & Jamison P. Pokorni J., Worthington C. Phonological awareness intervention : Comparison of fast forward, earbics, and lips. *J Educ Res*, 97 :147–157, 2004. (Cited on pages 37, 50, 54, and 96.)
- [224] R. A. Poldrack, E. Temple, A. Protopapas, S. Nagarajan, P. Tallal, M. Merzenich, and J. D. Gabrieli. Relations between the neural bases of dynamic auditory processing and phonological processing : evidence from fmri. *J Cogn Neurosci*, 13(5) : 687–697, Jul 2001. doi : 10.1162/089892901750363235. URL <http://dx.doi.org/10.1162/089892901750363235>. (Cited on page 56.)
- [225] Cathy J Price and Joseph T Devlin. The myth of the visual word form area. *Neuroimage*, 19(3) :473–481, Jul 2003. (Cited on page 30.)
- [226] K. R. Pugh, B. A. Shaywitz, S. E. Shaywitz, R. T. Constable, P. Skudlarski, R. K. Fulbright, R. A. Bronen, D. P. Shankweiler, L. Katz, J. M. Fletcher, and J. C. Gore. Cerebral organization of component processes in reading. *Brain*, 119 (Pt 4) :1221–1238, Aug 1996. (Cited on page 31.)

- [227] K. R. Pugh, W. E. Mencl, B. A. Shaywitz, S. E. Shaywitz, R. K. Fulbright, R. T. Constable, P. Skudlarski, K. E. Marchione, A. R. Jenner, J. M. Fletcher, A. M. Liberman, D. P. Shankweiler, L. Katz, C. Lacadie, and J. C. Gore. The angular gyrus in developmental dyslexia : task-specific differences in functional connectivity within posterior cortex. *Psychol Sci*, 11(1) :51–56, Jan 2000. (Cited on page 31.)
- [228] Friedemann Pulvermüller, Martina Huss, Ferath Kherif, Fermin Moscoso del Prado Martin, Olaf Hauk, and Yury Shtyrov. Motor cortex maps articulatory features of speech sounds. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 103(20) :7865–7870, May 2006. doi : 10.1073/pnas.0509989103. URL <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0509989103>. (Cited on page 31.)
- [229] J. B. DE QUIROS. Dysphasia and dyslexia in school children. *Folia Phoniatr (Basel)*, 16 :201–222, 1964. (Cited on page 6.)
- [230] F. Ramus. *La recherche HS 9*, chapter Dyslexie : la cognition en désordre? 2002. (Cited on page 37.)
- [231] F. Ramus. Developmental dyslexia : specific phonological deficit or general sensorimotor dysfunction? *Curr. Opin. Neurobiol.*, 13 : 212–218, Apr 2003. (Cited on page 106.)
- [232] Franck Ramus. Neurobiology of dyslexia : a reinterpretation of the data. *Trends Neurosci*, 27(12) :720–726, Dec 2004. doi : 10.1016/j.tins.2004.10.004. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.tins.2004.10.004>. (Cited on pages 17, 21, and 27.)
- [233] Franck Ramus and Gayaneh Szenkovits. What phonological deficit? *Q J Exp Psychol (Colchester)*, 61(1) :129–141, Jan 2008. doi : 10.1080/17470210701508822. URL <http://dx.doi.org/10.1080/17470210701508822>. (Cited on pages 13, 16, and 26.)
- [234] Franck Ramus, Elizabeth Pidgeon, and Uta Frith. The relationship between motor control and phonology in dyslexic children. *J Child Psychol Psychiatry*, 44(5) :712–722, Jul 2003. (Cited on pages 14, 16, 17, and 24.)
- [235] Franck Ramus, Stuart Rosen, Steven C Dakin, Brian L Day, Juan M Castellote, Sarah White, and Uta Frith. Theories of developmental dyslexia : insights from a multiple case study of dyslexic adults. *Brain*, 126(Pt 4) :841–865, Apr 2003. (Cited on pages 14, 16, and 50.)
- [236] M. A. Reed. Speech perception and the discrimination of brief auditory cues in reading disabled children. *J Exp Child Psychol*, 48 :270–292, Oct 1989. (Cited on page 108.)
- [237] Véronique Rey, Sonia De Martino, Robert Espesser, and Michel Habib. Temporal processing and phonological impairment in dyslexia : effect of phoneme lengthening on order judgment of two consonants. *Brain Lang*, 80(3) :576–591, Mar 2002. doi : 10.1006/brln.2001.2618. URL <http://dx.doi.org/10.1006/brln.2001.2618>. (Cited on page 17.)
- [238] David Reynolds, Roderick I Nicolson, and Helen Hambly. Evaluation of an exercise-based treatment for children with reading difficulties. *Dyslexia*, 9(1) :48–71 ; discussion 46–7, Feb 2003. doi :

- 10.1002/dys.235. URL <http://dx.doi.org/10.1002/dys.235>. (Cited on pages 39 and 40.)
- [239] T. L. Richards, D. Corina, S. Serafini, K. Steury, D. R. Echelard, S. R. Dager, K. Marro, R. D. Abbott, K. R. Maravilla, and V. W. Berninger. Effects of a phonologically driven treatment for dyslexia on lactate levels measured by proton mr spectroscopic imaging. *AJNR Am J Neuroradiol*, 21(5) :916–922, May 2000. (Cited on page 41.)
- [240] Todd Richards, Virginia Berninger, William Winn, Pat Stock, Richard Wagner, Andrea Muse, and Kenneth Maravilla. Functional mri activation in children with and without dyslexia during pseudoword aural repeat and visual decode : before and after treatment. *Neuropsychology*, 21(6) :732–741, Nov 2007. doi : 10.1037/0894-4105.21.6.732. URL <http://dx.doi.org/10.1037/0894-4105.21.6.732>. (Cited on page 99.)
- [241] Todd L Richards and Virginia W Berninger. Abnormal fmri connectivity in children with dyslexia during a phoneme task : Before but not after treatment 1. *J Neurolinguistics*, 21(4) :294–304, Jul 2008. doi : 10.1016/j.jneuroling.2007.07.002. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.jneuroling.2007.07.002>. (Cited on page 45.)
- [242] Todd L Richards, Elizabeth H Aylward, Katherine M Field, Amie C Grimme, Wendy Raskind, Anne L Richards, William Nagy, Mark Eckert, Christiana Leonard, Robert D Abbott, and Virginia W Berninger. Converging evidence for triple word form theory in children with dyslexia. *Dev Neuropsychol*, 30(1) :547–589, 2006. doi : 10.1207/s15326942dn3001_3. URL http://dx.doi.org/10.1207/s15326942dn3001_3. (Cited on page 32.)
- [243] Alexandra J Richardson and Paul Montgomery. The oxford-durham study : a randomized, controlled trial of dietary supplementation with fatty acids in children with developmental coordination disorder. *Pediatrics*, 115(5) :1360–1366, May 2005. doi : 10.1542/peds.2004-2164. URL <http://dx.doi.org/10.1542/peds.2004-2164>. (Cited on page 40.)
- [244] Fabrice Robichon, Mireille Besson, and Michel Habib. An electrophysiological study of dyslexic and control adults in a sentence reading task. *Biol Psychol*, 59(1) :29–53, Feb 2002. (Cited on page 33.)
- [245] Isabelle Rocheron, Christian Lorenzi, Christian Füllgrabe, and Annie Dumont. Temporal envelope perception in dyslexic children. *Neuroreport*, 13(13) :1683–1687, Sep 2002. (Cited on page 53.)
- [246] S. Rosen and E. Manganari. Is there a relationship between speech and nonspeech auditory processing in children with dyslexia ? *J Speech Lang Hear Res*, 44(4) :720–736, Aug 2001. (Cited on pages 14 and 17.)
- [247] Serge Ruff, Dominique Cardebat, Nathalie Marie, and Jean François Démonet. Enhanced response of the left frontal cortex to slowed down speech in dyslexia : an fmri study. *Neuroreport*, 13(10) :1285–1289, Jul 2002. (Cited on page 30.)

- [248] J. M. Rumsey, B. C. Donohue, D. R. Brady, K. Nace, J. N. Giedd, and P. Andreason. A magnetic resonance imaging study of planum temporale asymmetry in men with developmental dyslexia. *Arch Neurol*, 54(12) :1481–1489, Dec 1997. (Cited on page 29.)
- [249] J. M. Rumsey, B. Horwitz, B. C. Donohue, K. L. Nace, J. M. Maisog, and P. Andreason. A functional lesion in developmental dyslexia : left angular gyral blood flow predicts severity. *Brain Lang*, 70(2) :187–204, Nov 1999. doi : 10.1006/brln.1999.2158. URL <http://dx.doi.org/10.1006/brln.1999.2158>. (Cited on page 29.)
- [250] M. Rutter and W. Yule. The concept of specific reading retardation. *J Child Psychol Psychiatry*, 16(3) :181–197, Jul 1975. (Cited on page 5.)
- [251] R. Salmelin, E. Service, P. Kiesilä, K. Uutela, and O. Salonen. Impaired visual word processing in dyslexia revealed with magnetoencephalography. *Ann Neurol*, 40(2) :157–162, Aug 1996. doi : 10.1002/ana.410400206. URL <http://dx.doi.org/10.1002/ana.410400206>. (Cited on pages 29, 30, 32, and 33.)
- [252] R. Salmelin, P. Helenius, and E. Service. Neurophysiology of fluent and impaired reading : a magnetoencephalographic approach. *J Clin Neurophysiol*, 17(2) :163–174, Mar 2000. (Cited on pages 32 and 33.)
- [253] M. Sams, P. Paavilainen, K. Alho, and R. Näätänen. Auditory frequency discrimination and event-related potentials. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 62(6) :437–448, Nov 1985. (Cited on page 125.)
- [254] Andreia Santos, Barbara Joly-Pottuz, Sylvain Moreno, Michel Habib, and Mireille Besson. Behavioural and event-related potentials evidence for pitch discrimination deficits in dyslexic children : improvement after intensive phonic intervention. *Neuropsychologia*, 45(5) :1080–1090, Mar 2007. doi : 10.1016/j.neuropsychologia.2006.09.010. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.09.010>. (Cited on page 42.)
- [255] H. S. Scarborough. Predicting the future achievement of second graders with reading disabilities : Contributions of phonemic awareness, verbal memory, rapid naming, and iq. *Annals of Dyslexia*, 48 :115–136, 1998. (Cited on page 15.)
- [256] G. Schulte-Körne, W. Deimel, J. Bartling, and H. Remschmidt. Auditory processing and dyslexia : evidence for a specific speech processing deficit. *Neuroreport*, 9(2) :337–340, Jan 1998. (Cited on pages 14 and 34.)
- [257] G. Schulte-Körne, W. Deimel, J. Bartling, and H. Remschmidt. The role of phonological awareness, speech perception, and auditory temporal processing for dyslexia. *Eur Child Adolesc Psychiatry*, 8 Suppl 3 :28–34, 1999. (Cited on page 14.)
- [258] M. S. Seidenberg and J. L. McClelland. A distributed, developmental model of word recognition and naming. *Psychol Rev*, 96 (4) :523–568, Oct 1989. (Cited on page 10.)

- [259] M. Semrud-Clikeman, J. Biederman, S. Sprich-Buckminster, B. K. Lehman, S. V. Faraone, and D. Norman. Comorbidity between addh and learning disability : a review and report in a clinically referred sample. *J Am Acad Child Adolesc Psychiatry*, 31(3) :439–448, May 1992. (Cited on page 13.)
- [260] W. Serniclaes and L. Sprenger-Charolles. Categorical perception of speech sounds in dyslexia. *Current psychological letter. Behavior, Brain & Cognition*, 1(10), 2003. (Cited on page 18.)
- [261] W. Serniclaes, L. Sprenger-Charolles, R. Carré, and J. F. Demonet. Perceptual discrimination of speech sounds in developmental dyslexia. *J Speech Lang Hear Res*, 44(2) :384–399, Apr 2001. (Cited on pages 15, 18, 19, 27, 50, 108, 128, and 129.)
- [262] Willy Serniclaes, Sandra Van Heghe, Philippe Mousty, René Carré, and Liliane Sprenger-Charolles. Allophonic mode of speech perception in dyslexia. *J Exp Child Psychol*, 87(4) :336–361, Apr 2004. doi : 10.1016/j.jecp.2004.02.001. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.jecp.2004.02.001>. (Cited on pages 18, 50, and 108.)
- [263] R. V. Shannon, F. G. Zeng, V. Kamath, J. Wygonski, and M. Ekelid. Speech recognition with primarily temporal cues. *Science*, 270 (5234) :303–304, Oct 1995. (Cited on page 52.)
- [264] Jorm A. F. Maclean R. & Matthews R. Share, D. L. Temporal processing and reading disability. *Reading and Writing : An Interdisciplinary Journal*, 15 :151–178, 2002. (Cited on page 14.)
- [265] Bennett A Shaywitz, Sally E Shaywitz, Kenneth R Pugh, W. Einar Mencl, Robert K Fulbright, Pawel Skudlarski, R. Todd Constable, Karen E Marchione, Jack M Fletcher, G. Reid Lyon, and John C Gore. Disruption of posterior brain systems for reading in children with developmental dyslexia. *Biol Psychiatry*, 52(2) :101–110, Jul 2002. (Cited on pages 29 and 30.)
- [266] Bennett A Shaywitz, Sally E Shaywitz, Benita A Blachman, Kenneth R Pugh, Robert K Fulbright, Pawel Skudlarski, W. Einar Mencl, R. Todd Constable, John M Holahan, Karen E Marchione, Jack M Fletcher, G. Reid Lyon, and John C Gore. Development of left occipitotemporal systems for skilled reading in children after a phonologically- based intervention. *Biol Psychiatry*, 55(9) : 926–933, May 2004. doi : 10.1016/j.biopsycho.2003.12.019. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.biopsycho.2003.12.019>. (Cited on pages 43, 44, and 55.)
- [267] S. E. Shaywitz, B. A. Shaywitz, J. M. Fletcher, and M. D. Escobar. Prevalence of reading disability in boys and girls. results of the connecticut longitudinal study. *JAMA*, 264(8) :998–1002, 1990. (Cited on page xv.)
- [268] S. E. Shaywitz, B. A. Shaywitz, K. R. Pugh, R. K. Fulbright, R. T. Constable, W. E. Mencl, D. P. Shankweiler, A. M. Liberman, P. Skudlarski, J. M. Fletcher, L. Katz, K. E. Marchione, C. Lacadie, C. Gatenby, and J. C. Gore. Functional disruption in the organization of the brain for reading in dyslexia. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 95(5) :2636–2641, Mar 1998. (Cited on page 30.)

- [269] Sally E Shaywitz and Bennett A Shaywitz. Dyslexia (specific reading disability). *Biol Psychiatry*, 57(11) :1301–1309, Jun 2005. doi : 10.1016/j.biopsycho.2005.01.043. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.biopsycho.2005.01.043>. (Cited on page 30.)
- [270] Sally E Shaywitz, Bennett A Shaywitz, Robert K Fulbright, Pawel Skudlarski, W. Einar Mencl, R. Todd Constable, Kenneth R Pugh, John M Holahan, Karen E Marchione, Jack M Fletcher, G. Reid Lyon, and John C Gore. Neural systems for compensation and persistence : young adult outcome of childhood reading disability. *Biol Psychiatry*, 54(1) :25–33, Jul 2003. (Cited on pages 29, 30, 31, and 106.)
- [271] Sally E Shaywitz, Robin Morris, and Bennett A Shaywitz. The education of dyslexic children from childhood to young adulthood. *Annu Rev Psychol*, 59 :451–475, 2008. doi : 10.1146/annurev.psych.59.103006.093633. URL <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.psych.59.103006.093633>. (Cited on page 40.)
- [272] Mark M Shovman and Merav Ahissar. Isolating the impact of visual perception on dyslexics' reading ability. *Vision Res*, 46 (20) :3514–3525, Oct 2006. doi : 10.1016/j.visres.2006.05.011. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.visres.2006.05.011>. (Cited on page 26.)
- [273] P. G. Simos, J. I. Breier, J. M. Fletcher, B. R. Foorman, E. Bergman, K. Fishbeck, and A. C. Papanicolaou. Brain activation profiles in dyslexic children during non-word reading : a magnetic source imaging study. *Neurosci Lett*, 290(1) :61–65, Aug 2000. (Cited on page 31.)
- [274] P. G. Simos, J. M. Fletcher, E. Bergman, J. I. Breier, B. R. Foorman, E. M. Castillo, R. N. Davis, M. Fitzgerald, and A. C. Papanicolaou. Dyslexia-specific brain activation profile becomes normal following successful remedial training. *Neurology*, 58(8) :1203–1213, Apr 2002. (Cited on page 42.)
- [275] Wai Ting Siok, Zhen Jin, Paul Fletcher, and Li Hai Tan. Distinct brain regions associated with syllable and phoneme. *Hum Brain Mapp*, 18(3) :201–207, Mar 2003. doi : 10.1002/hbm.10094. URL <http://dx.doi.org/10.1002/hbm.10094>. (Cited on page 31.)
- [276] Ruxandra Sireteanu, Ralf Goertz, Iris Bachert, and Timo Wandert. Children with developmental dyslexia show a left visual "minineglect". *Vision Res*, 45(25-26) :3075–3082, Nov 2005. doi : 10.1016/j.visres.2005.07.030. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.visres.2005.07.030>. (Cited on page 38.)
- [277] B. C. Skottun. The magnocellular deficit theory of dyslexia. *Trends Neurosci*, 20(9) :397–398, Sep 1997. (Cited on page 21.)
- [278] Bernt C Skottun. Magnocellular reading and dyslexia. *Vision Res*, 45(1) :133–4; author reply 135–6, Jan 2005. doi : 10.1016/j.visres.2003.09.039. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.visres.2003.09.039>. (Cited on page 21.)
- [279] Bernt Christian Skottun and John R Skoyles. Some remarks on the use of motion veps to assess magnocellular sensitivity. *Clin*

- Neurophysiol*, 115(12) :2834–6; author reply 2836–8, Dec 2004. doi : 10.1016/j.clinph.2004.06.021. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.clinph.2004.06.021>. (Cited on page 21.)
- [280] John Skoyles and Bernt Christian Skottun. On the prevalence of magnocellular deficits in the visual system of non-dyslexic individuals. *Brain Lang*, 88(1) :79–82, Jan 2004. (Cited on page 21.)
- [281] W. L. Slaghuis and J. F. Ryan. Spatio-temporal contrast sensitivity, coherent motion, and visible persistence in developmental dyslexia. *Vision Res*, 39(3) :651–668, Feb 1999. (Cited on page 14.)
- [282] Zachary M Smith, Bertrand Delgutte, and Andrew J Oxenham. Chimaeric sounds reveal dichotomies in auditory perception. *Nature*, 416(6876) :87–90, Mar 2002. doi : 10.1038/416087a. URL <http://dx.doi.org/10.1038/416087a>. (Cited on page 52.)
- [283] M. Snowling, D. V. Bishop, and S. E. Stothard. Is preschool language impairment a risk factor for dyslexia in adolescence? *J Child Psychol Psychiatry*, 41(5) :587–600, Jul 2000. (Cited on page 14.)
- [284] M. J. Snowling. *Dyslexia* (2 ed.). Oxford, 2000. (Cited on page 14.)
- [285] Anne J Sperling, Zhong-Lin Lu, Franklin R Manis, and Mark S Seidenberg. Deficits in perceptual noise exclusion in developmental dyslexia. *Nat Neurosci*, 8(7) :862–863, Jul 2005. doi : 10.1038/nn1474. URL <http://dx.doi.org/10.1038/nn1474>. (Cited on page 25.)
- [286] Anne J Sperling, Zhong-Lin Lu, Franklin R Manis, and Mark S Seidenberg. Motion-perception deficits and reading impairment : it's the noise, not the motion. *Psychol Sci*, 17(12) :1047–1053, Dec 2006. doi : 10.1111/j.1467-9280.2006.01825.x. URL <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-9280.2006.01825.x>. (Cited on page 106.)
- [287] Colé P. Béchenec D. Sprenger-Charolles, L. and A. Kipffer-Piquard. French normative data on reading and related skills : From 7 to 10-year-olds. *European Review of Applied Psychology*, 55 : 157–186, 2005. (Cited on pages 65, 67, 68, and 69.)
- [288] L. ; Sprenger-Charolles and P. Colé. *Lecture et dyslexie : approche cognitive*. Paris, 2003. (Cited on page 6.)
- [289] L. Sprenger-Charolles and W. Serniclaes. Reliability of phonological and surface subtypes in developmental dyslexia : A review of five multiple case studies. *Current psychological letter. Behavior, Brain and Cognition*, 1(10), 2003. (Cited on page 12.)
- [290] L. Sprenger-Charolles, P. Colé, P. Lacert, and W. Serniclaes. On subtypes of developmental dyslexia : evidence from processing time and accuracy scores. *Can J Exp Psychol*, 54(2) :87–104, Jun 2000. (Cited on pages 10, 11, and 59.)
- [291] Larissa I Stanberry, Todd L Richards, Virginia W Berninger, Rajesh R Nandy, Elizabeth H Aylward, Kenneth R Maravilla, Patricia S Stock, and Dietmar Cordes. Low-frequency signal changes

- reflect differences in functional connectivity between good readers and dyslexics during continuous phoneme mapping. *Magn Reson Imaging*, 24(3) :217–229, Apr 2006. doi : 10.1016/j.mri.2005.12.006. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.mri.2005.12.006>. (Cited on pages 31 and 32.)
- [292] K. E. Stanovich. Explaining the differences between the dyslexic and the garden-variety poor reader : the phonological-core variable-difference model. *J Learn Disabil*, 21(10) :590–604, Dec 1988. (Cited on page 14.)
- [293] K. E. Stanovich and L. S. Siegel. The phenotypic performance profile of reading-disabled children : a regression based test of the phonological core variable-difference model. *Journal of Educational Psychology*, 86 :24–53, 1994. (Cited on page 14.)
- [294] K. E. Stanovich, L. S. Siegel, and A. Gottardo. Converging evidence for phonological and surface subtypes of reading disability. *Journal of Educational Psychology*, 89 :114–127, 1997. (Cited on page 10.)
- [295] J. Stein. The neurobiology of reading difficulties. *Prostaglandins Leukot Essent Fatty Acids*, 63(1-2) :109–116, 2000. doi : 10.1054/plf.2000.0200. URL <http://dx.doi.org/10.1054/plf.2000.0200>. (Cited on page 21.)
- [296] J. Stein. The magnocellular theory of developmental dyslexia. *Dyslexia*, 7(1) :12–36, 2001. doi : 10.1002/dys.186. URL <http://dx.doi.org/10.1002/dys.186>. (Cited on page 21.)
- [297] J. Stein and V. Walsh. To see but not to read ; the magnocellular theory of dyslexia. *Trends Neurosci*, 20(4) :147–152, Apr 1997. (Cited on page 21.)
- [298] J. F. Stein, A. J. Richardson, and M. S. Fowler. Monocular occlusion can improve binocular control and reading in dyslexics. *Brain*, 123 (Pt 1) :164–170, Jan 2000. (Cited on page 38.)
- [299] R. M. Stelmack and J. Miles. The effect of picture priming on event-related potentials of normal and disabled readers during a word recognition memory task. *J Clin Exp Neuropsychol*, 12(6) :887–903, Dec 1990. (Cited on page 33.)
- [300] R. M. Stelmack, B. J. Saxe, N. Noldy-Cullum, K. B. Campbell, and R. Armitage. Recognition memory for words and event-related potentials : a comparison of normal and disabled readers. *J Clin Exp Neuropsychol*, 10(2) :185–200, Mar 1988. (Cited on page 33.)
- [301] John Stoitsis, Giorgos A Giannakakis, Charalabos Papageorgiou, Konstantina S Nikita, Andreas Rabavilas, and Dimitris Anagnostopoulos. Evidence of a posterior cingulate involvement (brodmann area 31) in dyslexia : a study based on source localization algorithm of event-related potentials. *Prog Neuropsychopharmacol Biol Psychiatry*, 32(3) :733–738, Apr 2008. doi : 10.1016/j.pnpbp.2007.11.022. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.pnpbp.2007.11.022>. (Cited on page 100.)

- [302] Ulrich Strehlow, Johann Haffner, Jürgen Bischof, Volker Gratzka, Peter Parzer, and Franz Resch. Does successful training of temporal processing of sound and phoneme stimuli improve reading and spelling? *Eur Child Adolesc Psychiatry*, 15(1) :19–29, Feb 2006. doi : 10.1007/s00787-006-0500-4. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s00787-006-0500-4>. (Cited on page 37.)
- [303] M. Studdert-Kennedy. Deficits in phoneme awareness do not arise from failures in rapid auditory processing. *Reading & Writing*, 15 : 5–14, 2002. (Cited on page 17.)
- [304] Gayaneh Szenkovits and Franck Ramus. Exploring dyslexics' phonological deficit : lexical vs sub-lexical and input vs output processes. *Dyslexia*, 11(4) :253–268, Nov 2005. (Cited on page 106.)
- [305] M. Tabuchi, T. Fujii, K. Suzuki, K. Endou, and A. Yamadori. [effect of number of syllables in word repetition]. *No To Shinkei*, 52(1) : 29–35, Jan 2000. (Cited on pages 31 and 99.)
- [306] J. Talairach and P. Tournoux. *Co-Planar Stereotactic Atlas of the Human Brain*. Thieme Medical Publishers, 1988. (Cited on page 150.)
- [307] P. Tallal. Auditory temporal perception, phonics, and reading disabilities in children. *Brain Lang*, 9 :182–198, Mar 1980. (Cited on pages 16, 17, 37, 106, and 129.)
- [308] P. Tallal and N. Gaab. Dynamic auditory processing, musical experience and language development. *Trends Neurosci.*, 29 :382–390, Jul 2006. (Cited on page 106.)
- [309] P. Tallal and M. Piercy. Defects of non-verbal auditory perception in children with developmental aphasia. *Nature*, 241(5390) :468–469, Feb 1973. (Cited on page 24.)
- [310] P. Tallal, S. Miller, and R. H. Fitch. Neurobiological basis of speech : a case for the preeminence of temporal processing. *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, 682 :27–47, Jun 1993. (Cited on page 106.)
- [311] P. Tallal, S. L. Miller, G. Bedi, G. Byma, X. Wang, S. S. Nagarajan, C. Schreiner, W. M. Jenkins, and M. M. Merzenich. Language comprehension in language-learning impaired children improved with acoustically modified speech. *Science*, 271(5245) :81–84, Jan 1996. (Cited on pages 38, 51, 54, and 60.)
- [312] P. Tallal, M. Merzenich, S. Miller, and W. Jenkins. Language learning impairment : integrating research and remediation. *Scand J Psychol*, 39(3) :197–199, Sep 1998. (Cited on page 37.)
- [313] A. Tarkiainen, P. Helenius, P. C. Hansen, P. L. Cornelissen, and R. Salmelin. Dynamics of letter string perception in the human occipitotemporal cortex. *Brain*, 122 (Pt 11) :2119–2132, Nov 1999. (Cited on page 32.)
- [314] K.E. Taylor and A.J. Richardson. Visual function, fatty acids and dyslexia. *Prostaglandins Leukot Essent Fatty Acids*, 63(1-2) :89–93, 2000. (Cited on page 21.)
- [315] M. J. Taylor. *Handbook of neuropsychology*, chapter The role of event-related potentials in the study of normal and abnormal cognitive development., pages Vol. 10, pp. 187–211. Amsterdam; New York : Elsevier., 1995. (Cited on page 33.)

- [316] M. J. Taylor and N. K. Keenan. Event-related potentials to visual and language stimuli in normal and dyslexic children. *Psychophysiology*, 27(3) :318–327, May 1990. (Cited on page 33.)
- [317] E. Temple, R. A. Poldrack, A. Protopapas, S. Nagarajan, T. Salz, P. Tallal, M. M. Merzenich, and J. D. Gabrieli. Disruption of the neural response to rapid acoustic stimuli in dyslexia : evidence from functional mri. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 97(25) :13907–13912, Dec 2000. doi : 10.1073/pnas.240461697. URL <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.240461697>. (Cited on pages 30 and 55.)
- [318] E. Temple, R. A. Poldrack, J. Salidis, G. K. Deutsch, P. Tallal, M. M. Merzenich, and J. D. Gabrieli. Disrupted neural responses to phonological and orthographic processing in dyslexic children : an fmri study. *Neuroreport*, 12(2) :299–307, Feb 2001. (Cited on page 29.)
- [319] Elise Temple, Gayle K Deutsch, Russell A Poldrack, Steven L Miller, Paula Tallal, Michael M Merzenich, and John D E Gabrieli. Neural deficits in children with dyslexia ameliorated by behavioral remediation : evidence from functional mri. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 100(5) :2860–2865, Mar 2003. doi : 10.1073/pnas.0030098100. URL <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0030098100>. (Cited on pages 43, 50, 55, and 98.)
- [320] Friel-Patti S. & Britt L. Thibodeau, L. Psychoacoustic performance in children completing fast forward training. *American Journal of Speech-Language Pathology.*, 10 :248–257, 2001. (Cited on pages 54 and 96.)
- [321] H. Tiitinen, P. May, K. Reinikainen, and R. Näätänen. Attentive novelty detection in humans is governed by pre-attentive sensory memory. *Nature*, 372(6501) :90–92, Nov 1994. doi : 10.1038/372090a0. URL <http://dx.doi.org/10.1038/372090a0>. (Cited on page 125.)
- [322] J. K. Torgesen. *The science of reading : a handbook*. Malden, MA ; Oxford : Blackwell Pub., 2005. (Cited on page 40.)
- [323] J. K. Torgesen, R. K. Wagner, and C. A. Rashotte. Longitudinal studies of phonological processing and reading. *J Learn Disabil*, 27(5) :276–86 ; discussion 287–91, May 1994. (Cited on page 14.)
- [324] J. K. Torgesen, A. W. Alexander, R. K. Wagner, C. A. Rashotte, K. K. Voeller, and T. Conway. Intensive remedial instruction for children with severe reading disabilities : immediate and long-term outcomes from two instructional approaches. *J Learn Disabil*, 34(1) :33–58, 78, 2001. (Cited on pages 35, 36, 40, and 54.)
- [325] Wagner R. K. Rashotte C. A. Rose E. Lindamood P. Torgesen, J. K. and T. Conway. Preventing reading failure in young children with phonological processing disabilities : Group and individual responses to instruction. *Journal of Educational Psychology*, 91 : 579–593, 1999. (Cited on page 34.)
- [326] G. Troia and S. Whitney. A close look at the efficacy of fast forward language for children with academic weaknesses. *Contemporary Educational Psychology*, 28 :465–494, 2003. (Cited on pages 54 and 96.)

- [327] C. W. Turner, P. E. Souza, and L. N. Forget. Use of temporal envelope cues in speech recognition by normal and hearing-impaired listeners. *J Acoust Soc Am*, 97(4) :2568–2576, Apr 1995. (Cited on page 52.)
- [328] C. W. Tyler, L. L. Kontsevich, and T. C. Ferree. Independent components in stimulus-related bold signals and estimation of the underlying neural responses. *Brain Res*, 1229 :72–89, Sep 2008. doi : 10.1016/j.brainres.2008.06.050. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.brainres.2008.06.050>. (Cited on page 86.)
- [329] J. C. Hansen J. Larsen V. D. Calhoun, T. Adali and J. J. Pekar. Ica of fmri : An overview. In *Proc. Int. Conf. on ICA and BSS, Nara, Japan.*, 2003. (Cited on page 86.)
- [330] Bosse M. L. Ans B. Carbonnel S. Zorman M. David D. Valdois, S. Phonological and visual processing deficits can dissociate in developmental dyslexia : Evidence from two case studies. *Reading and Writing : An Interdisciplinary Journal*, 16(6) :541–572, 2003. (Cited on page 22.)
- [331] Sylviane Valdois, Marie-Line Bosse, and Marie-Josèphe Tainturier. The cognitive deficits responsible for developmental dyslexia : review of evidence for a selective visual attentional disorder. *Dyslexia*, 10(4) :339–363, Nov 2004. doi : 10.1002/dys.284. URL <http://dx.doi.org/10.1002/dys.284>. (Cited on pages 9, 22, and 38.)
- [332] R. van der Horst, A. R. Leeuw, and W. A. Dreschler. Importance of temporal-envelope cues in consonant recognition. *J Acoust Soc Am*, 105(3) :1801–1809, Mar 1999. (Cited on page 52.)
- [333] Guy C. Van Orden, Bruce F. Pennington, and Gregory O. Stone. What do double dissociations prove? *Cognitive Science*, 2001. (Cited on page 6.)
- [334] F. R. Vellutino. *Dyslexia : theory and research*. Cambridge, Mass, 1979. (Cited on pages 12 and 14.)
- [335] F. R. Vellutino, D. M. Scanlon, and D. Spearing. Semantic and phonological coding in poor and normal readers. *J Exp Child Psychol*, 59(1) :76–123, Feb 1995. doi : 10.1006/jecp.1995.1004. URL <http://dx.doi.org/10.1006/jecp.1995.1004>. (Cited on page 14.)
- [336] Frank R Vellutino, Jack M Fletcher, Margaret J Snowling, and Donna M Scanlon. Specific reading disability (dyslexia) : what have we learned in the past four decades? *J Child Psychol Psychiatry*, 45(1) :2–40, Jan 2004. (Cited on page 54.)
- [337] Frank R Vellutino, Donna M Scanlon, Sheila Small, and Diane P Fanuele. Response to intervention as a vehicle for distinguishing between children with and without reading disabilities : Evidence for the role of kindergarten and first-grade interventions. *J Learn Disabil*, 39(2) :157–169, 2006. (Cited on page 34.)
- [338] Kerstin von Plessen, Arvid Lundervold, Nicolae Duta, Einar Heiervang, Frederick Klauschen, Alf Inge Smievoll, Lars Ersland,

- and Kenneth Hugdahl. Less developed corpus callosum in dyslexic subjects—a structural mri study. *Neuropsychologia*, 40(7) : 1035–1044, 2002. (Cited on page 28.)
- [339] K. M. Walker, S. E. Hall, R. M. Klein, and D. P. Phillips. Development of perceptual correlates of reading performance. *Brain Res.*, 1124 :126–141, Dec 2006. (Cited on page 106.)
- [340] Suiping Wang, Zude Zhu, John X Zhang, Zhaoxin Wang, Zhuangwei Xiao, Huadong Xiang, and Hsuan-Chih Chen. Broca's area plays a role in syntactic processing during chinese reading comprehension. *Neuropsychologia*, 46(5) :1371–1378, Apr 2008. doi : 10.1016/j.neuropsychologia.2007.12.020. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2007.12.020>. (Cited on page 99.)
- [341] D. Wechsler. *Manuel de l'échelle d'Intelligence de Wechsler pour enfants*. 1996. (Cited on page 57.)
- [342] D. Wechsler. Wechsler intelligence scale for children, fourth edition (wisc-iv) administration and scoring manual. *San Antonio, TX : The Psychological Corporation*. (Cited on page 111.)
- [343] J. F. Werker and R. C. Tees. The organization and reorganization of human speech perception. *Annu Rev Neurosci*, 15 :377–402, 1992. doi : 10.1146/annurev.ne.15.030192.002113. URL <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.ne.15.030192.002113>. (Cited on page 108.)
- [344] Sarah White, Elizabeth Milne, Stuart Rosen, Peter Hansen, John Swettenham, Uta Frith, and Franck Ramus. The role of sensorimotor impairments in dyslexia : a multiple case study of dyslexic children. *Dev Sci*, 9(3) :237–55; discussion 265–9, May 2006. doi : 10.1111/j.1467-7687.2006.00483.x. URL <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-7687.2006.00483.x>. (Cited on pages 14 and 16.)
- [345] H. Wimmer, H. Mayringer, and T. Raberger. Reading and dual-task balancing : evidence against the automatization deficit explanation of developmental dyslexia. *J Learn Disabil*, 32(5) :473–478, 1999. (Cited on page 14.)
- [346] Mayringer H. Wimmer, H. and K. Landerl. Poor reading : A deficit of skill-automatization or a phonological deficit? *Scientific Studies of Reading*, 2 :321–340, 1998. (Cited on page 14.)
- [347] I. Winkler, A. Lehtokoski, P. Alku, M. Vainio, I. Czigler, V. Csépe, O. Aaltonen, I. Raimo, K. Alho, H. Lang, A. Iivonen, and R. Näätänen. Pre-attentive detection of vowel contrasts utilizes both phonetic and auditory memory representations. *Brain Res Cogn Brain Res*, 7(3) :357–369, Jan 1999. (Cited on pages 125 and 126.)
- [348] B. W. Wise, J. Ring, and R. K. Olson. Training phonological awareness with and without explicit attention to articulation. *J Exp Child Psychol*, 72(4) :271–304, Apr 1999. doi : 10.1006/jecp.1999.2490. URL <http://dx.doi.org/10.1006/jecp.1999.2490>. (Cited on page 36.)

- [349] B. W. Wise, J. Ring, and R. K. Olson. Individual differences in gains from computer-assisted remedial reading. *J Exp Child Psychol*, 77(3) :197–235, Nov 2000. doi : 10.1006/jecp.1999.2559. URL <http://dx.doi.org/10.1006/jecp.1999.2559>. (Cited on pages 36 and 54.)
- [350] Caroline Witton, John F Stein, Catherine J Stoodley, Burton S Rosner, and Joel B Talcott. Separate influences of acoustic am and fm sensitivity on the phonological decoding skills of impaired and normal readers. *J Cogn Neurosci*, 14(6) :866–874, Aug 2002. doi : 10.1162/089892902760191090. URL <http://dx.doi.org/10.1162/089892902760191090>. (Cited on page 53.)
- [351] T. Zeffiro and G. Eden. The cerebellum and dyslexia : perpetrator or innocent bystander? *Trends Neurosci*, 24(9) :512–513, Sep 2001. (Cited on page 30.)
- [352] Johannes C Ziegler, Conrad Perry, Anna Ma-Wyatt, Diana Ladner, and Gerd Schulte-Körne. Developmental dyslexia in different languages : language-specific or universal? *J Exp Child Psychol*, 86(3) :169–193, Nov 2003. (Cited on pages 37 and 50.)

COLOPHON

This thesis was typeset with L^AT_EX 2_ε using Hermann Zapf’s *Palatino* and *Euler* type faces (Type 1 PostScript fonts *URW Palladio L* and *FPL* were used). The listings are typeset in *Bera Mono*, originally developed by Bitstream, Inc. as “Bitstream Vera”. (Type 1 PostScript fonts were made available by Malte Rosenau and Ulrich Dirr.)

The typographic style was inspired by [Bringhurst’s](#) genius as presented in *The Elements of Typographic Style* [45]. It is available for L^AT_EX via CTAN as “[classicthesis](#)”.

NOTE : The custom size of the textblock was calculated using the directions given by Mr. Bringhurst (pages 26–29 and 175/176). 10 pt Palatino needs 133.21 pt for the string “abcdefghijklmnopqrstuvwxyz”. This yields a good line length between 24–26 pc (288–312 pt). Using a “*double square textblock*” with a 1 :2 ratio this results in a textblock of 312 :624 pt (which includes the headline in this design). A good alternative would be the “*golden section textblock*” with a ratio of 1 :1.62, here 312 :505.44 pt. For comparison, DIV9 of the typearea package results in a line length of 389 pt (32.4 pc), which is by far too long. However, this information will only be of interest for hardcore pseudo-typographers like me.

Final Version as of 22 mars 2010 at 10:27.