

Déficits auditifs perceptifs et capacités en lecture chez les enfants dyslexiques : effet d'un entraînement audio-visuel

*Evelyne Veuillet^{1,3}, Annie Magnan²
et Jean Ecalle²*

Résumé

L'apprentissage de la lecture repose sur des mécanismes dont la défaillance peut conduire à la dyslexie. Les dyslexiques sont en difficultés dans l'analyse segmentale des mots et ainsi dans l'acquisition de stratégies de conversion graphèmes - phonèmes. L'origine commune probable des troubles pourrait être un déficit affectant le traitement temporel des informations. Au niveau auditif, ce défaut d'intégration temporelle entraîne une incapacité à entendre des distinctions acoustiques parmi les sons brefs et successifs. Ce handicap dans la perception des contrastes phonémiques pourrait reposer sur des phénomènes anormaux de masquage d'interférence dans les voies auditives. Nous avons caractérisé les compétences phonologiques et comparé les aptitudes pour traiter le voisement chez des enfants normo-lecteurs et des enfants dyslexiques. Des différences significatives sont mises en évidence entre les groupes. Par ailleurs, le fonctionnement des voies auditives descendantes, filtre auditif périphérique fonctionnant sous contrôle central, a été

1. UMR CNRS 5020, Neurosciences et Systèmes Sensoriels, Pavillon U, Hôpital Edouard Herriot, 3 place d'Arsonval, 69437 Lyon cedex 03, France (email : evelyne.veuillet@chu-lyon.fr)

2. Laboratoire EMC/DDL, UMR-CNRS 5596 Université Lyon 2

3. Centre de référence pour les troubles des apprentissages chez l'enfant, Service d'Audiologie et d'Explorations Orofaciales, Hôpital Edouard Herriot, Pavillon U, Lyon

mesuré ; elles tendent à présenter des différences d'asymétrie fonctionnelle entre les deux groupes. Enfin nous présentons, au travers de quatre cas, des résultats préliminaires de l'évolution des performances de dyslexiques soumis à un entraînement audiovisuel proposant un apprentissage phonologique implicite. Des modifications positives et homogènes entre les différents paramètres testés sont décrites.

Mots clés : traitement auditif temporel, phonologie, voies auditives descendantes, latéralité, entraînement, dyslexie, perception catégorielle.

Key words: auditory temporal processing, phonology, VOT, descending pathways, laterality, training, dyslexia, categorical perception.

INTRODUCTION

Malgré des années de scolarité, les enfants dyslexiques présentent des déficits dans la représentation et l'utilisation de l'information phonologique (Liberman et Shankweiler, 1985 ; Stanovitch, 1988 ; Wagner et Torgesen, 1987). Ces déficits observés avant même l'apprentissage de la lecture (Frith, 1985 ; Lundberg et Høien, 1990 ; Wimmer, 1993, 1996 ; Sprenger-Charolles, Lacert, Colé et Serniclaes, 1999) pourraient entraver l'apprentissage du système de correspondance grapho-phonémique. Or cette étape est cruciale pour apprendre à lire, comme le montrent les nombreuses études consacrées aux relations entre l'apprentissage de la lecture et les habiletés phonologiques, c'est-à-dire la capacité à opérer une analyse phonologique du langage oral (Content, 1985 ; Gombert, 1990 ; Lecocq, 1991 ; Wagner et Torgesen, 1987). L'habileté phonologique apparaît comme bi-directionnelle, à la fois cause et conséquence de l'apprentissage de la langue écrite, et constitue un bon prédicteur de la réussite en lecture (Bradley et Bryant, 1978 ; Lecocq, 1991 ; Lundberg et Høien, 1990 ; Lundberg, Olofsson et Wall, 1980 ; Mann et Liberman, 1984 ; Wimmer, Landerl, Linortner et Hummer, 1991). L'apprentissage du code alphabétique repose sur la capacité à décomposer les mots en phonèmes et des liens très forts existent entre conscience phonémique et progrès en lecture (Stanovitch, Cunningham et Cramer, 1984a ;

Stanovitch, Cunningham et Freeman, 1984b ; Lundberg et al., 1980). Toutefois deux niveaux de traitements peuvent être distingués. Un traitement épiphonologique, qui renvoie au fait que les unités linguistiques traitées ne sont pas directement disponibles et manipulables intentionnellement, et un traitement métaphonologique, qui renvoie à une prise de conscience explicite des unités, identifiées et extraites de façon réfléchie et dont l'apparition serait stimulée par l'enseignement formel de la langue écrite (Gombert et Colé, 2000). Deux études longitudinales récentes (Ecalte et Magnan, 2002, en révision) mettent en évidence que, d'une part, les compétences métaphonologiques d'enfants évalués en début de cours préparatoire (CP) sont de bons prédicteurs de leurs performances en reconnaissance de mots écrits en fin de CP et que, d'autre part, les compétences métaphonologiques en CP sont clairement prédites par les compétences épiphonologiques en grande section (GS) de maternelle. Il n'existe, à notre connaissance, aucune étude examinant les caractéristiques des traitements épi- et métaphonologiques des enfants dyslexiques francophones.

L'origine de ces troubles phonologiques décrits dans la dyslexie fait aujourd'hui l'objet de plusieurs théories. De solides arguments soutiennent l'idée que certains enfants apprenant difficilement la lecture se caractérisent par une incapacité à traiter l'information auditive. Certains auteurs défendent l'idée selon laquelle la dyslexie développementale reposerait sur un déficit du traitement temporel de toute information auditive (Tallal et Stark, 1981), alors que d'autres défendent un déficit du traitement de la parole de nature phonologique (Brandt et Rosen, 1980 ; Mody, Studdert-Kennedy et Berdy, 1997). La nature de ce déficit sous-jacent à la dyslexie, auditive ou phonologique, est controversée. Si l'on se réfère à l'observation initiale de Tallal (1980) selon laquelle « les enfants dyslexiques, comparativement à des enfants contrôles du même âge, présentent des difficultés pour identifier et juger correctement l'ordre de stimuli sonores de courte durée présentés en succession rapide », l'hypothèse d'un déficit auditif aspécifique est envisageable. Par la suite, plusieurs études comme celles de DeWeirdt (1988) et Reed (1989) et, plus récemment, de Heiervang, Stevenson et Hugdahl (2002) confirment cette hypothèse. D'autres travaux montrant chez les mauvais lecteurs des anomalies dans l'analyse des sons, qu'il s'agisse de sons

purs, complexes, de l'environnement ou linguistiques, argumentent en faveur du caractère général de ce déficit auditif. Ainsi, concernant les tâches de discrimination d'intensité (dI) de sons purs, des déficits sont décrits chez certains enfants mauvais lecteurs (Cacace, McFarland, Ouimet, Schrieber et Marro, 2000 ; McArthur et Hogben, 2001), posant la question de savoir si les moindres performances observées ne sont pas seulement imputables à la rapidité des stimulations auditives. Pour le traitement de la fréquence, Baldeweg, Richardson, Witkins, Foale et Gruzelier (1999) rapportent, chez l'adulte mauvais lecteur ayant présenté des troubles d'acquisition de la lecture dans l'enfance, des difficultés à percevoir des fréquences déviantes. De plus, des protocoles psycho-acoustiques à charge mnésique réduite ont montré des seuils plus élevés de détection de différences de fréquences chez des adultes dyslexiques (McAnally et Stein, 1996 ; Hari, Sääskilähti, Helenius et Uutela, 1999 ; France et al., 2000 ; Ahissar, Protopapas, Reid et Merzenich, 2000), argumentant en faveur d'une résolution fréquentielle pauvre. Ces moindres performances dans la détection de petits changements de fréquence de son pur autour d'une fréquence de 1 kHz suggèrent des difficultés pour générer ou décoder des décharges neuronales strictement en phase avec le stimulus. Ainsi, sous-jacentes à la dyslexie, il existerait des anomalies dans la résolution temporelle du signal acoustique. Les dyslexiques seraient en difficulté pour détecter des interruptions dans un bruit blanc (McCroskey et Kidder, 1980), ce résultat étant toutefois controversé (McAnally et Stein, 1996 ; Ahissar et al., 2000 ; Schulte-Korne, Deinel, Bartling et Remschmidt, 1998). De même, de moindres performances sont observées chez certains dyslexiques dans des tâches de détection de sons brefs présentés monoralement dans un bruit masquant (Wright, Lombardino, King, Puranik, Leonard et Mezernich, 1997), ou présentés binauralement (McAnally et Stein, 1996 ; Dougherty, Cynader, Bjomson, Egdell et Giaschi, 1998). Toutefois ces dégradations des compétences, qui reposent sur l'utilisation des différences inter-aurales de temps, sont observées pour des sons de 1 kHz (McAnally et Stein, 1996) mais pas de 0,2 kHz (Hill, Bailey, Griffiths et Snowling, 1999). De même, les dyslexiques ne diffèrent plus des témoins lorsque la durée du son à détecter est longue (Wright et al., 1997 ; McAnally et Stein, 1996 ; Hill et al., 1999) ou lorsque le son est temporellement

centré dans une période de silence entre les périodes de bruit (Helzer, Champlin et Gillam, 1996). En revanche, il est de plus en plus évident que certains mauvais lecteurs présentent des difficultés chaque fois qu'ils ont à percevoir des sons organisés en séquence. Ainsi, ils discriminent moins bien la durée entre deux sons purs seulement dans la condition où d'autres sons les entourent (Kujala, Myllyviita, Tervaniemi, Alho, Kallio et Näätanen, 2000). De plus, lors des tâches de discrimination dans le bruit, c'est la condition de masquage rétroactif (i. e. lorsque le son à détecter est suivi d'une autre stimulation auditive) qui est la plus dégradante pour les dyslexiques (Rosen et Mangarini, 1999 ; Bishop, Carlyon, Deeks et Bishop, 1999 ; McArthur et Hogben, 2001 ; Hartley et Moore, 2002). Ces difficultés pour percevoir des sons séquentiels se reflètent dans la ségrégation excessive des flux sonores que réalisent les dyslexiques adultes (Helenius, Uutela et Hari, 1999). Cela conduit à supposer l'existence, d'une part, d'interférences excessives dans le message sonore et, d'autre part, d'un élargissement de la fenêtre auditive imputable à un ralentissement des intégrations perceptives. Cependant, la brièveté des stimuli et leur organisation en séquences ne sont pas les seuls facteurs auditifs limitant les performances des dyslexiques. En effet, certains adultes montrent une moindre sensibilité à la modulation de fréquence (FM) mais uniquement aux faibles taux de modulation (Witton et al., 1998 ; Talcott et al., 2000 ; Witton, Stein, Stoodley, Rosner et Talcott, 2002) correspondant aux taux de modulation trouvés au niveau de la syllabe dans la parole. Ils présentent également une mauvaise discrimination de la FM pour les fréquences porteuses basses (Stein et McAnally, 1995). De plus, des déficits dans la détection de la modulation d'amplitude (AM) sont plutôt décrits aux taux de modulation de l'ordre de 20 Hz (McAnally et Stein, 1996 ; Hari et al., 1999 ; Mennell, McAnally et Stein, 1999) mais pas à 2 Hz (Witton et al., 2002). Enfin, une récente étude montre que les enfants dyslexiques détectent plus difficilement que des enfants contrôles les battements générés dans un signal modulé en amplitude (Goswami et al., 2002). Ainsi, des troubles variés, plus ou moins constants mais purement auditifs, sont décrits dans la dyslexie, conduisant Amitay, Ahissar et Nelken (2002) à qualifier certains de leurs sujets adultes présentant des difficultés en lecture de « poor auditory processor ».

Cependant, les relations de causalité entre compétences auditives et compétences en lecture ne sont pas clairement établies à ce jour. Parmi les études récentes, Ahissar et al. (2000) et Van Ingelghem, van Wieringen, Wouters, Vandebussche, Onghena et Ghesquière (2001) concluent à des liens entre une résolution auditive dégradée et une mauvaise lecture. D'autres trouvent chez l'enfant une relation modérée à forte entre la sensibilité aux stimulations auditives dynamiques et les compétences en lecture (Witton et al., 1998 ; Talcott et al., 2000). Par contre, Heiervang et al. (2002) rapportent une faible corrélation entre le déficit dans le traitement des sons brefs se succédant rapidement et les difficultés de lecture des « non mots » chez des enfants dyslexiques. Mais, toujours chez des enfants dyslexiques, Kujala et al. (2001) observent que l'entraînement avec un matériel auditif et visuel non linguistique entraîne une augmentation significative des performances en lecture (temps de lecture de mots et nombre de mots correctement lus) et également une augmentation de l'onde de discordance supposée refléter une meilleure discrimination auditive (Kraus, McGee, Carrell, Zecker, Nicol et Koch, 1995).

Face à l'ensemble de ces résultats, la poursuite des recherches sur les troubles du traitement de l'information auditive chez le dyslexique, en tentant en même temps de mieux connaître les mécanismes neurophysiologiques défaillants, nous paraît nécessaire. Il va alors s'agir d'en mesurer les conséquences sans oublier de considérer la dyslexie comme une pathologie pouvant aussi être de nature parole spécifique (voir Breier, Gray, Fletcher, Foorman et Klass, 2002). D'ailleurs, Serniclaes, Sprenger-Charolles, Carre et Démonet (2001), observant que les enfants dyslexiques ont beaucoup plus de difficultés lorsqu'il s'agit de situer une frontière catégorielle à partir d'un matériel verbal (phonèmes) que non verbal (analogues sinusoidaux de parole), considèrent que les déficits de l'enfant dyslexique sont spécifiques au traitement du matériel linguistique. En fait, ces controverses concernant la nature phonologique et/ou auditive du trouble dyslexique restent entièrement d'actualité. Elles se justifient pleinement toutes deux à partir du moment où l'on considère qu'un signal de parole est avant tout une onde sonore constituée de séquences de signaux acoustico-phonétiques (Koch, McGee, Bradlow et Kraus, 1999) incluant des variations de fréquence et d'intensité, des

modulations en fréquence et amplitude, des périodes de silence, de bouffées tonales et de bruits de diverses durées. Le système auditif doit être capable d'encoder ces indices acoustiques de base, devenant l'objet d'une représentation sensorielle corticale, elle-même mise en relation avec les traits distinctifs constituant les phonèmes (point d'articulation, voisement, ...). Il s'agit ici d'une analyse phonétique abstraite (auditivo-linguistique) de nature catégorielle à l'issue de laquelle, suite à des filtres, il y a élimination des variations phonétiques sans valeur distinctive et activation du phonème correspondant aux traits phonétiques perçus. On peut aisément concevoir qu'une représentation parfaite des détails spectraux et temporels des traits acoustiques constituant les « sons de la parole » facilite l'encodage des figures acoustiques dans les représentations phonologiques. Cela n'est possible que si le traitement de l'information auditive est optimal et, dans ce cas, il se ferait une translation automatique et sans effort du code phonologique vers le script orthographique (et inversement). En revanche, des déficits de résolution temporelle et spectrale (Ahissar et al., 2000), ou un ralentissement des entrées perceptives contribuant à la surposition ou, à l'inverse, à l'extrême séparation des traits phonétiques (Helenius et al., 1999), pourraient pénaliser les manipulations grapho-phonémiques rendant la lecture lente et difficile.

Les objectifs du travail expérimental dont quelques résultats préliminaires sont présentés ici étaient de préciser les mécanismes de traitement auditif et phonologique qui sont dégradés chez le dyslexique, et de voir comment un entraînement peut les modifier. Des travaux antérieurs, conduits sur des enfants en difficulté pour apprendre à lire, sont en faveur d'un effet bénéfique des tâches d'écoute de parole modifiée (Tallal et al., 1996 ; Mezernich, Jenkins, Johnston, Schreiner, Miller et Tallal, 1996). Plus récemment, Habib et al. (2002) ont montré une amélioration des compétences en lecture chez des enfants. Les auteurs reconnaissent eux-mêmes que c'est probablement l'entraînement sur du matériel verbal lui-même et non le ralentissement de l'information qui a conduit à un gain de performances. À cette amélioration des compétences en lecture s'ajoute un meilleur traitement de l'information temporelle, en particulier une meilleure identification des stimuli brefs et successifs et de meilleures performances dans une tâche de jugement d'ordre temporel. Une

amélioration des compétences d'écoute dans le bruit a également été décrite (King, Warrier, Hayes et Kraus, 2002).

Dans ce travail, nous présentons des résultats obtenus chez des enfants témoins et dyslexiques concernant, d'une part les compétences en lecture avec la mesure des *habiletés phonologiques* et, d'autre part, au niveau acoustico-phonémique, les *compétences* dans le traitement d'un indice acoustique appelé voisement. Cette sensibilité au voisement a été étudiée au travers d'une tâche de catégorisation phonétique qui est supposée refléter les étapes précoces de l'analyse acoustique perceptive temporelle. Enfin, pour mieux connaître les bases neurophysiologiques déficitaires chez le dyslexique, nous avons procédé à une *exploration objective du fonctionnement des voies auditives descendantes (VAD)*, impliquées dans les phénomènes d'interaction cochléaire (Collet, Kemp, Veillet, Duclaux, Moulin et Morgon, 1990) et fonctionnant probablement sous contrôle central (Khalifa et al., 2001). Leur rôle serait de filtrer l'information auditive dès la périphérie, permettant en particulier d'améliorer l'intelligibilité dans le bruit (Giraud, Garner, Micheyl, Lina, Chays et Chéry-Croze, 1997). Les résultats d'un travail antérieur sont en faveur d'un dysfonctionnement de ces VAD chez l'enfant dysorthographique (Veillet, Bazin et Collet, 1999). Ces trois paramètres ont d'une part été comparés chez des populations d'enfants dyslexiques et témoins, et d'autre part été suivis longitudinalement chez des enfants dyslexiques soumis, à l'aide d'un logiciel audio-visuel, à des exercices basés sur l'opposition sourde - sonore. L'objectif était principalement d'établir des relations éventuellement causales entre les modifications des habiletés phonologiques et certains traitements auditifs.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Sujets

Compte tenu du caractère préliminaire des résultats, la description des sujets inclus dans chaque expérimentation se trouve juste avant la présentation des résultats.

Tests utilisés

Habiletés épi-méta-phonologiques. Le niveau d'habileté phonologique a été évalué avec une épreuve composée de trois tâches (Eccles, Magnan et Bouchafa, 2002) : (1) une tâche épiphonologique de jugement de similarité phonologique, où il s'agit d'entourer deux images (parmi 4) représentant deux mots partageant une même unité phonologique, syllabe ou phonème, placée à l'initiale ou à la fin du mot ; (2) une tâche méta-phonologique d'extraction d'unité commune (syllabe ou phonème) à deux mots (Duncan, Seymour et Hill, 1997), l'unité commune étant soit en début soit à la fin du mot ; (3) enfin, une tâche métaphonologique de segmentation phonémique nécessitant un niveau d'habileté phonologique plus élevé.

Procédure d'identification du test de perception catégorielle. Les capacités des sujets à percevoir les changements dans le VOT (« voice onset time », ou délai d'établissement du voisement) ont été mesurées en utilisant un continuum « /BA/ - /PA/ » composé à partir d'un signal naturel de parole, gracieusement fourni par Yves Cazals. Ce continuum est constitué de plusieurs stimuli se différenciant entre eux par le VOT en début de signal. Pour ne pas allonger excessivement la durée d'expérimentation, seule la procédure d'identification a été utilisée. Les variations de cet indice acoustique étant perçues de manière catégorielle (Liberman, Harris, Hoffman et Griffith, 1957 ; Liberman, Cooper, Shankweiler et Studdert-Kennedy, 1967), la procédure d'identification a l'avantage de permettre d'apprécier la sensibilité au voisement par le calcul de la frontière phonétique, c'est-à-dire le VOT, pour lequel le sujet perçoit autant de /BA/ que de /PA/. Toujours pour abrégier la durée du test, nous avons sélectionné 16 signaux sur les 26 du continuum initial. La présentation a été binaurale et répétée 5 fois, l'ordre des signaux étant aléatoire. Au total, 80 signaux de parole ont donc été administrés à l'enfant assis à côté de l'expérimentateur dans une pièce calme. Les sons ont été présentés à une intensité de 60 dBHL au moyen d'un casque (TDH39) relié à un audiomètre (AC40). La consigne donnée à l'enfant était d'indiquer à l'expérimentateur ce qu'il percevait par pointage du doigt sur une feuille où étaient inscrites en gros caractères gras les

occlusives B et P et au-dessus desquelles figurait le dessin en couleur d'un ballon (pour le B) et d'un papillon pour le P. Après confrontation des courbes au modèle « tangente hyperbolique », la frontière perceptive a été calculée. Elle correspond à la valeur du VOT, égal à 50 % d'identification (hasard).

Exploration des voies auditives descendantes (VAD). Elle repose sur l'enregistrement des Otoémissions Acoustiques Provoquées (OEAPs) en réponse à une stimulation auditive. Ces OEAPs, que l'on recueille au moyen d'une sonde placée à l'entrée du conduit auditif externe, sont supposées être le reflet de la contraction active des Cellules Ciliées Externes (CCEs) situées dans l'oreille interne au niveau de l'organe de Corti. Ces cellules sont directement contactées par des fibres appartenant aux voies auditives descendantes (VAD) constituant le système efférent olivocochléaire médian (SEOCM). La mesure des OEAPs en présence et en absence d'une stimulation acoustique administrée dans l'oreille controlatérale permet d'explorer non invasivement la voie non croisée du SEOCM (Collet et al., 1990). Comme ces fibres sont inhibitrices, la stimulation acoustique a pour effet de diminuer la contraction des CCEs, se traduisant par une diminution d'amplitude des OEAPs. Ces réponses ont été recueillies à 5 intensités de stimulation comprises entre 54 et 72 dB SP, alternativement sans et avec un bruit blanc de 30 dB SL présenté dans l'oreille controlatérale, selon un protocole décrit en détail ailleurs (Veuillet et al., 1999). Les deux oreilles ont été testées l'une à la suite de l'autre, dans un ordre aléatoire. La suppression controlatérale des OEAPs a été exprimée sous forme d'atténuation équivalente (AE), qui correspond à la modification à apporter à l'intensité de la stimulation provoquant l'OEAP pour obtenir la même amplitude avec et sans bruit controlatéral. Plus cette valeur est négative, plus l'intensité ipsilatérale doit être diminuée, et plus la VAD est inhibitrice et donc fonctionnelle. Afin de déterminer l'asymétrie de fonctionnement de cette voie, un quotient de latéralité (QLAB), correspondant à la différence entre l'AE mesurée sur l'oreille droite et celle sur l'oreille gauche, a été calculé. Plus ce quotient est négatif et plus l'asymétrie est en faveur de l'oreille droite.

Entraînement audio-visuel. L'entraînement, extrait d'un logiciel encore non commercialisé d'entraînement à la lecture à destination des enfants à risque de dyslexie ("Play-On", Danon-Boileau et Barbier, 2000), a porté sur l'opposition de voisement entre les items de six paires de phonèmes, deux phonèmes d'une paire se différenciant par le trait phonétique de voisement (voisé vs non voisé). Il était présenté sous forme de jeu de basket. L'enfant muni d'un casque entendait un stimulus (par exemple /pi/) et voyait simultanément apparaître à l'écran deux alternatives écrites (pi et bi) parmi lesquelles il devait reconnaître la cible entendue. Un ballon correspondant au stimulus apparaissait en haut de l'écran, la tâche consistait à le placer dans l'un des deux paniers de basket correspondant à l'une ou l'autre alternative écrite. Au début de l'exercice, au cours d'une phase de familiarisation, une couleur était associée à chaque ballon, le ballon apparaissait ensuite d'une seule couleur (grise) et seule la catégorisation auditive permettait d'effectuer la tâche. En cas d'erreur, les ballons réapparaissaient colorés pour une série d'essais. L'entraînement durait 5 semaines, les enfants ont été entraînés 2 fois par jour, 15 minutes par séance, 4 jours par semaine, soit au total 10 heures d'entraînement.

RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES : capacités phonologiques et compétences auditives d'enfants dyslexiques et d'enfants témoins

Comparaison du niveau d'habiletés phonologiques

Les sujets se répartissent en deux groupes :

(1) Un groupe de 12 dyslexiques (âge moyen : 10;2 ans, 9;4 - 12;1) qui étaient scolarisés dans une école spécialisée accueillant des enfants présentant des troubles d'apprentissage du langage oral et écrit. Ils appartenaient à différents niveaux scolaires (CE1, CE2, CM1, CM2) correspondant respectivement aux deuxième, troisième, quatrième et cinquième années de primaire. Ces enfants suivaient un enseignement adapté à leur trouble et bénéficiaient de séances d'orthophonie régulières une à deux fois par semaine. Ces enfants ne présentaient ni troubles

associés, ni déficience intellectuelle (QIP et QIV > 70) et manifestaient un retard de lecture supérieur à 18 mois (Lefavrais, 1967).

(2) Un groupe de 67 enfants sans trouble de lecture. Ils étaient tous normalement scolarisés dans des écoles de la région lyonnaise et se répartissaient comme suit :

- 24 enfants d'âge moyen 6;2 ans (5;9 - 6;6) scolarisés en CP (première année de primaire), testés en début d'année scolaire au mois d'octobre (CPd) ;
- 23 enfants d'âge moyen 6;8 ans (6;5 - 7;1) scolarisés en CP (première année de primaire), testés en fin d'année scolaire au mois de mai (CPf) ;
- 20 enfants d'âge moyen 7;11 ans (7;7 - 8;4) scolarisés en CE1 (deuxième année de primaire), testés en fin d'année scolaire au mois de mai (CE1f).

La Figure 1 permet de situer les performances phonologiques obtenues par les enfants de chacun des deux groupes quelle que soit la tâche. On peut voir clairement sur ce graphique que les performances des dyslexiques, malgré leur âge et plusieurs années de scolarité, se situent au niveau de celles des enfants de CP entre le début et la fin de l'année scolaire. Une analyse de variance à un seul facteur effectuée sur l'ensemble des résultats montre un effet significatif du facteur groupe, $F(3, 75) = 49.04, p < .0001$. Les tests post-hoc (test de Tukey) révèlent que les performances des dyslexiques sont significativement supérieures à celles des enfants scolarisés en début de CP ($p < .0001$) et significativement inférieures à celles des enfants en fin de CE1 ($p < .001$), alors qu'elles ne diffèrent pas significativement de celles des enfants en fin de CP ($p > .10$).

Comparaison des performances d'identification du voisement et du fonctionnement des VAD

Les 14 enfants inclus dans les comparaisons se répartissent en deux groupes de 7 sujets, chacun comprenant 1 fille et 6 garçons appariés entre eux en âge chronologique. Le groupe d'enfants témoins avait une moyenne d'âge de 9;5 ans (min : 7;8 - max : 11;1) et celle du groupe des dyslexiques de 10;2 ans (8;3 - 11;6). Tous étaient droitiers manuel-

lement (quotient de latéralité mesuré au moyen du questionnaire d'Edinburgh [Oldfield, 1971] supérieur à 80 %). Les enfants dyslexiques ont été sélectionnés dans le groupe de 12 enfants dyslexiques décrits juste avant. Les 7 enfants témoins ne présentaient aucune déficience intellectuelle, étaient tous normalement scolarisés et n'avaient jamais redoublé. Tous étaient exempts de troubles du langage oral ou écrit et aucun n'avait bénéficié de rééducation orthophonique. Leur niveau de lecture, vérifié au moyen du test de l'Alouette (Lefavrais, 1967), correspondait à leur niveau de scolarisation. Ils ne présentaient aucune atteinte auditive particulière. Les enfants de ces deux groupes étaient tous normoentendants et ne présentaient aucune pathologie auditive particulière.

Figure 1. Nombre moyen de réponses correctes (score global) par groupe de lecteurs aux épreuves d'habiletés phonologiques.

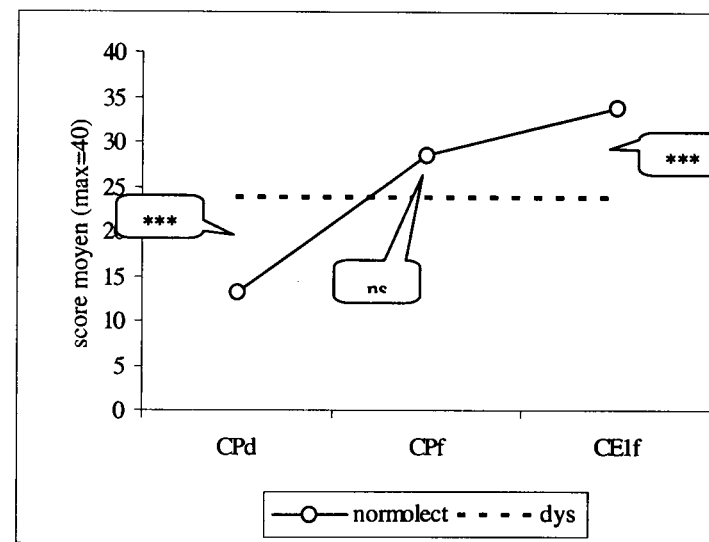


Figure 1. Mean number of correct responses (global score) by groups of readers on phonological skill tests.

Figure 3. Valeur de la frontière perceptive pour chaque enfant de chaque groupe.

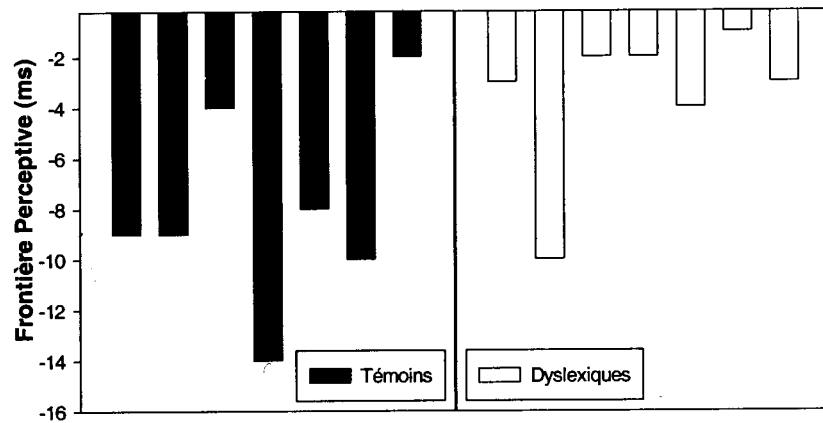


Figure 3. Perceptual boundary value for each child from each group.

La Figure 4 permet de comparer entre le groupe des témoins et celui des dyslexiques le fonctionnement des VAD. La Figure 4a montre qu'en moyenne les VAD sont autant inhibitrices dans les deux groupes, avec une tendance toutefois à être plus fonctionnelles dans l'oreille droite (OD) chez les témoins et dans l'oreille gauche (OG) chez les dyslexiques. Si les AE ne diffèrent pas de façon significative entre les oreilles ou entre les groupes, en revanche le quotient de latéralité (Figure 4b) est significativement plus négatif chez les témoins que chez les dyslexiques ($t[12] = 3.144, p = .012$) traduisant un avantage de fonctionnement des VAD en faveur de l'OD chez les témoins et de l'OG chez les dyslexiques. Ce résultat est en faveur d'une différence de latéralisation fonctionnelle auditive. Comme pour le test d'identification du continuum

/BA/ /PA/, nous nous sommes intéressés aux données individuelles (Figure 5). On constate que si 6 enfants témoins sur 7 sont latéralisés en faveur de l'OD alors qu'en revanche 6 dyslexiques sur 7 présentent des VAD plus fonctionnelles à gauche. Il semblerait donc que cette latéralisation inversée du fonctionnement des VAD entre témoins et dyslexiques soit un paramètre important de différenciation de ces deux populations.

Figure 4. Fonctionnement des voies auditives descendantes. (a) comparaison des atténuations équivalentes entre l'oreille droite (OD) et gauche (OG) pour chaque groupe d'enfants. (b) quotient de latéralisation ($QL_{OD} - QL_{OG}$). En noir : 7 enfants témoins et en blanc 7 enfants dyslexiques (moyenne \pm erreur standard). [$* p < .05$.]

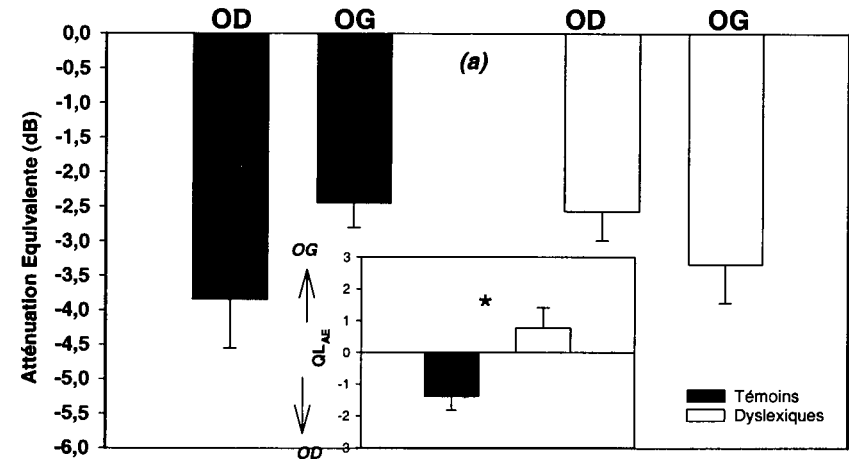


Figure 4. Descending auditory pathway functioning. (a) Comparison of equivalent attenuation (EA) between right (RE) and left (LE) ear for each group of children. (b) Laterality quotient ($LQ_{RE} - LQ_{LE}$). (Black: control children; white: dyslexic children) (mean \pm sd). [$* p < .05$.]

Figure 5. Valeur des quotients de latéralité (QL_{AE}) pour chaque enfant de chaque groupe.

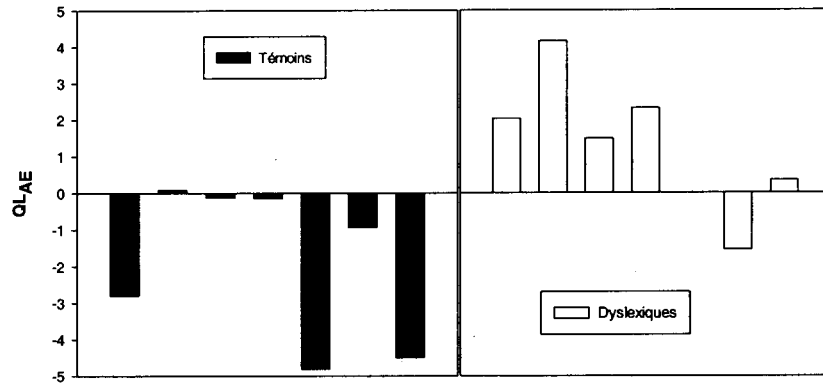


Figure 5. Laterality quotient (LQ_{EA}) for each child from each group.

Effet de l'entraînement

Compte tenu du caractère préliminaire de cette expérimentation et du fait, en particulier, que des groupes contrôles sont encore en cours de constitution, seule l'étude de quatre cas est présentée ici. Quatre dyslexiques (2 filles - 2 garçons) ont été choisis parmi les 12 enfants du groupe précédemment décrit comme ayant bénéficié de l'entraînement audio-visuel intensif. Sur les Figures 6 (haut-gauche et haut-droite) sont respectivement représentés la frontière perceptive et le quotient de latéralité de fonctionnement des VAD (en abscisses) en fonction des habiletés phonologiques (en ordonnées). On observe que, pour 3 enfants, les habiletés phonologiques varient dans le sens d'une amélioration entre avant et après entraînement. Ils sont également 3 à présenter une modification de la frontière perceptive et tous montrent une modification plus

ou moins marquée du quotient de latéralité. À la différence des habiletés phonologiques, qui lorsqu'elles varient ne font que s'améliorer, les paramètres auditifs peuvent évoluer dans des directions opposées. Ainsi, deux enfants présentent une augmentation des catégorisations en /PA/ pour des signaux à voisement court se traduisant par un déplacement de la frontière perceptive vers la gauche alors que, pour l'un d'entre eux, il y a un recul de la frontière perceptive. Nous pouvons remarquer que ce déplacement vers la droite s'opère chez un enfant qui catégorisait correctement le voisement avant l'entraînement. Concernant les VAD, pour 2 enfants sur 4 l'évolution du quotient de latéralité se fait nettement en direction d'une atténuation de l'avantage en faveur de l'OG. Pour les deux autres enfants, l'un tend à accroître son asymétrie en faveur de l'OD, tandis que pour l'autre les VAD tendent à devenir plus fonctionnelles sur l'OG. La confrontation des modifications des habiletés phonologiques à celles de la frontière perceptive (Figure 6, haut), n'est pas en faveur de liens évidents entre ces deux paramètres. Ainsi sur les 3 enfants dont les habiletés phonologiques s'améliorent après l'entraînement (CY : gain de 27,5 % ; LA : 12,5 % ; et SA : 15 %), l'un (CY) conserve la même frontière perceptive, un autre (SA) présente un décalage vers la gauche et troisième (LA) encore vers la droite. En outre, un enfant (CH) ne présente aucune modification de ses habiletés phonologiques alors que la perception catégorielle s'est sensiblement améliorée après l'entraînement. En revanche, lorsque visuellement on met en corrélation les évolutions des habiletés phonologiques et celles du quotient de latéralité de fonctionnement des VAD (Figure 6, milieu), des liens plus précis se dessinent puisque, chaque fois que les habiletés phonologiques s'améliorent, ce qui est le cas pour 3 enfants (LA, CY et SA), une réduction de ce quotient est observée. Pour l'enfant CH, dont les habiletés phonologiques restent stables, le quotient augmente, traduisant un déplacement de la latéralisation en faveur de l'OG après l'entraînement. On peut d'ailleurs noter qu'il s'agit de l'enfant dyslexique gauchère manuellement et si sa frontière perceptive s'est fortement décalée vers la gauche entre les deux mesures, cette enfant reste toutefois encore en grande difficulté dans la catégorisation du continuum /BA/ /PA/. Tout semblerait se passer comme si l'entraînement rétablissait une latéralité des VAD en accord avec la latéralité manuelle et de meilleures

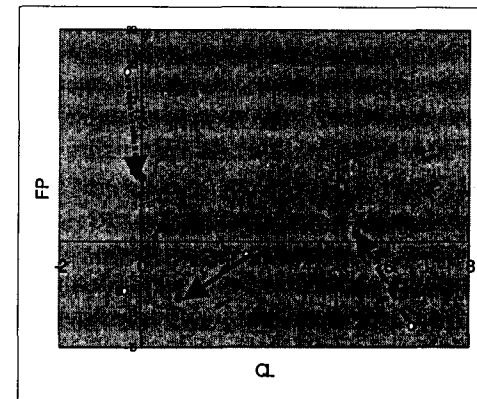
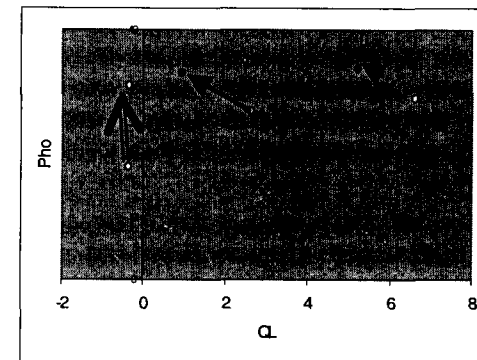
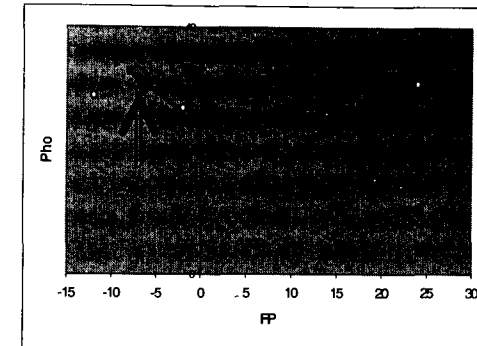
compétences dans la manipulation phonologique. Il faut toutefois rester prudent sur ces conclusions extrapolées à partir de 4 cas. Enfin, la mise en parallèle des variations des deux paramètres auditifs (Figure 6, bas) complexifie considérablement les interprétations puisqu'aucun lien inter-individuellement stable n'apparaît.

Figure 6. Évolutions des différents paramètres mesurés avant (points blancs) et après (points noirs) entraînement. Étude de cas pour 4 enfants dyslexiques : CH, CY, LA, SA.

[En haut : frontière perceptive et scores en habiletés phonologiques; flèche en trait interrompu pour Ch, flèche en trait plein pour Sa, double flèche pour Cy, flèche en pointillés pour La. Au milieu : quotient de latéralisation des voies auditives descendantes (VAD) et scores en habiletés phonologiques ; pas de flèche pour Ch, flèche en trait plein pour Sa, double flèche pour Cy, flèche en pointillés pour La. En bas : quotient de latéralité des VAD et frontière perceptive; Flèche en trait interrompu pour Ch, flèche en trait plein pour Sa, pas de flèche pour Cy, flèche en pointillés pour La].

Figure 6. Change on the various parameters measured, before (white dots) and after (black dots) training. Case studies for 4 dyslexic children: CH, CY, LA, SA.

Top: perceptual boundary and phonological skill score; broken line arrow for Ch; filled-line arrow for Sa; double arrow for Cy; and dotted-line arrow for La. Middle: auditory descending pathways (ADP) laterality quotient and phonological skill score, no arrow for Ch; dotted-line arrow for La; double arrow for Cy; and filled-line arrow for Sa. Bottom: ADP laterality quotient and perceptual boundary; broken line arrow for Ch; dotted-line arrow for La; no arrow for Cy; and filled-line arrow for Sa.



CONCLUSION

Ces résultats préliminaires apportent non seulement de nouveaux arguments en faveur de la présence de troubles auditifs chez le dyslexique, mais ils permettent aussi de rapprocher ces dysfonctionnements des déficits de certaines habiletés phonologiques fortement impliquées dans la mise en place de bonnes compétences en lecture.

Ils confirment les nombreux travaux, dont ceux de Cornelissen, Hansen, Bradley et Stein (1996) et Manis et al. (1997), montrant que seuls certains enfants dyslexiques présentent des difficultés pour catégoriser certaines occlusives voisées et non voisées. Même si la tâche de perception catégorielle proposée ici fait appel à des traitements plutôt linguistiques de nature, puisque le signal présenté est un signal de parole naturelle, le voisement est un indice temporel acoustique et l'on ne peut pas éliminer l'existence d'un déficit de ce type de traitement chez le dyslexique. Concernant le traitement auditif, ces résultats qui confirment des anomalies de fonctionnement des VAD chez l'enfant présentant des troubles de l'apprentissage (Veillet et al., 1999) sont les premiers à objectiver l'existence d'une latéralisation altérée du fonctionnement des VAD chez certains dyslexiques. Comme il est fort probable que cette latéralisation soit le reflet d'asymétries centrales (Khalifa et Collet, 1996 ; Khalifa, Veillet et Collet, 1998 ; Veillet, Georgieff, Philibert, Dalery, Marie-Cardine et Collet, 2001), des liens entre cette latéralité et les compétences en lecture sont possibles. D'ailleurs ce travail, qui montre aussi que les dyslexiques se caractérisent par des habiletés phonologiques réduites, est un premier pas vers l'établissement de tels liens. D'autant plus que des variations concomitantes semblent se dessiner entre les différents paramètres mesurés avant et après un entraînement audiovisuel ayant porté sur le trait phonétique de voisement. Ainsi, s'il semble que cet entraînement tende à améliorer certains enfants dans la façon dont ils traitent le voisement, il a également pu être associé à une amélioration des compétences phonologiques et, dans certains cas, à une évolution de la latéralité fonctionnelle des VAD. L'entraînement pourrait avoir été efficace pour développer chez l'enfant dyslexique des représentations phonologiques plus précises et justes grâce à un meilleur traitement du voisement. Cette conclusion va dans le même sens que les

données obtenues par Bedoin (2003) dans une tâche de détection de lettres présentées avant et après le même entraînement.

Toutefois, on doit rester prudent face à ces premiers résultats. S'ils tendent à être en faveur, d'une part, de liens entre les paramètres auditifs perceptifs et les compétences phonologiques et, d'autre part, d'un effet positif de l'entraînement en double modalité sur ces paramètres, l'interprétation reste délicate. En effet, les résultats sont peu homogènes entre les enfants et les groupes testés sont de faible taille. Il seront donc à confirmer sur un plus grand nombre d'enfants dyslexiques en tenant compte plus particulièrement du type de troubles dont souffre l'enfant en lecture. On sait en effet, et ces résultats préliminaires le confirment, que les déficits du dyslexique peuvent présenter une grande variabilité inter-individuelle qui va probablement agir sur la sensibilité à l'entraînement. En outre, il sera indispensable de s'intéresser au déficit auditif de base pouvant être à l'origine de cette sensibilité amoindrie au voisement qui caractérise certains dyslexiques, et de voir comment ce facteur va interférer avec le traitement de l'information phonologique. Enfin, il faudra poursuivre les recherches en vue de préciser les mécanismes neurophysiologiques défailants dans la dyslexie.

REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié du soutien du Ministère de la Recherche (ACI École et Sciences Cognitives, programme « Apprentissage des langues, dysfonctionnements et remédiations »).

Nous remercions Mme Sophie Jéry, orthophoniste et directrice de l'École spécialisée « La Fourmi » (Lyon) pour son aide dans le recrutement des enfants dyslexiques, ainsi que les enseignants de cette école pour leur accueil et leur collaboration. Nous remercions également Mmes le Dr Isabelle Soarès Boucaud et Isabelle Gervais, respectivement pédopsychiatre et neuropsychologue au Centre de Référence de l'Hôpital Édouard Herriot, pour leur contribution dans l'initiation du programme d'entraînement et Mrs Laurent Danon-Boileau et Denis Barbier pour nous avoir permis d'utiliser leur logiciel. Nos remerciements s'adressent

également aux étudiants qui ont activement pris part au recueil des données. Enfin, un grand merci à tous les enfants qui se sont toujours prêtés aux tests avec beaucoup d'enthousiasme et de persévérance.

ABSTRACT

Learning to read is based on mechanisms the lack of which may lead to dyslexia, a specific disturbance of written language. Dyslexic children have great difficulty with the segmental analysis of words, and hence with acquiring grapheme-phoneme conversion strategies. Among the various hypotheses which have been proposed for dyslexia, there is a basic deficit affecting the temporal processing of information by the brain. At the auditory level, such a temporal integration impairment makes the dyslexic child unable to hear the acoustic distinctions between the brief successive sounds involved in speech. But such a phoneme processing deficit might come from an elementary auditory problem which was not only sensory (low-level) but also based on central auditory processes involving the cortex and thus high-level processing. One may wonder whether difficulty in phoneme contrast perception might not derive from abnormal masking of interference in the coded acoustic information flow in the auditory pathways. Such disturbed acoustic message integration might then be attributable to abnormal functioning on the part of certain inhibitory mechanisms. As it happens, the auditory pathways comprise inhibitory fibres, some of which – such as those of the medial olivocochlear efferent system – are thought to play a role in the central control of cochlear functioning. This presentation seeks, firstly, to compare between normal-reading and dyslexic children the phonological competencies and the sensitivity to voicing contrast. We confirm the low scores of dyslexic children in the phonological tasks and observe that some of them are particularly impaired in voicing contrast perception. Moreover we compare between these two populations the functioning of the descending auditory pathways and observe functioning which are abnormally lateralized in the majority of dyslexic children. Secondly we present preliminary results concerning the follow-up of the performance of four dyslexic children undergoing training based on the

principle of implicit phonologic learning. Positive and related modifications are observed between the different parameters.

BIBLIOGRAPHIE

- Ahissar, M., Protopapas, A., Reid, M., & Merzenich, M. M. (2000). Auditory processing parallels reading abilities in adults. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 97, 6832-6837.
- Amitay, S., Ahissar, M., & Nelken, I. (2002). Auditory processing deficits in reading disabled adults. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology*, 3, 302-320.
- Baldeweg, T., Richardson, A., Witkins, S., Foale, C., & Gruzelier, J. (1999). Impaired auditory frequency discrimination in dyslexia detected with mismatch evoked potentials. *Annals of Neurology*, 45, 495-503.
- Bedoin N. (2003). Sensitivity to voicing similarity in printed stimuli: Effect of a training programme in dyslexic children. *Journal of Phonetics*, 31, 541-546.
- Bishop, D. V. M., Carlyon, R. P., Deeks, J. M., & Bishop, S. J. (1999). Auditory temporal processing impairment: neither necessary nor sufficient for causing language impairment in children. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, 42, 1295-1310.
- Bradley, L., & Bryant, P. (1978). Difficulties in auditory organization as a possible cause of reading backwardness. *Nature*, 271, 746-747.
- Brandt, J., & Rosen, J. (1980). Auditory phonemic perception in dyslexia: categorical identification and discrimination of stop consonants. *Brain and Language*, 9, 324-337.
- Breier, J. I., Gray, L. C., Fletcher, J. M., Foorman, B., & Klaas, P. (2002). Perception of speech and nonspeech stimuli by children with and without reading disability and attention deficit hyperactivity disorder. *Journal of Experimental Child Psychology*, 82, 226-250.
- Cacace, T., McFarland, D. J., Quimet, J. R., Schrieber, E. J., & Marro, P. (2000). Temporal processing deficits in remediation-resistant reading-impaired children. *Audiology and Neuro-Otology*, 5, 83-97.
- Collet, L., Kemp, D. T., Veillet, E., Duclaux, R., Moulin, A., & Morgon, A. (1990). Effect of contralateral auditory stimuli on active cochlear micro-mechanical properties in humans subjects. *Hearing Research*, 43, 251-262.
- Content, A. (1985). Le développement de l'habileté d'analyse phonétique de la parole. *L'Année Psychologique*, 85, 73-99.

- Cornelissen, P. L., Hansen, P. C., Bradley, L., & Stein, J. F. (1996). Analysis for perceptual confusions between nine sets of consonant-vowel sounds in normal and dyslexic adults. *Cognition*, *59*, 275-306.
- Danon-Boileau, L., & Barbier, D. (2000). *Play-On: un logiciel d'entraînement à la lecture*. Paris: Audivi-Média.
- DeWeirdt, W. (1988). Speech perception and frequency discrimination in good and poor readers. *Applied Psycholinguistics*, *9*, 163-183.
- Dougherty, R., Cynader, M., Bjomson, B., Egdell, D., & Giaschi, D. (1998). Dichotic pitch: a new stimulus distinguishes normal and dyslexic auditory function. *Neuroreport*, *9*, 3001-3005.
- Duncan, L., Seymour, P., & Hill, S. (1997). How important are rhyme and analogy in beginning reading? *Cognition*, *63*, 171-208.
- Ecalte, J., & Magnan, A. (2002). The development of epiphonological and metaphonological processing at the start of reading: A longitudinal study. *European Journal of Psychology of Education*, *17*, 47-62.
- Ecalte, J., & Magnan, A. (en révision). Development of phonological sensitivity and learning to read in French: From epi- to metalinguistic processing.
- Ecalte, J., Magnan, A., & Bouchafa, H. (2002). Le développement des habiletés phonologiques avant et au cours de l'apprentissage de la lecture: de l'évaluation à la remédiation. *Glossa*, *82*, 2-12.
- France, S. J., Rosner, B. S., Calvin, C., Talcott, J. B., Richardson, A. J., & Stein, J. F. (2000). Auditory frequency discrimination in adult developmental dyslexics. *Perception and Psychophysics*, *64*, 169-179.
- Frith, U. (1985). Beneath the surface of developmental dyslexia. In K. Patterson, J. Marschall, & M. Coltheart (Eds.), *Surface dyslexia* (pp. 310-330). London: Erlbaum.
- Giraud, A. L., Garner, S., Micheyl, C., Lina, G., Chays, A., & Chéry-Croze, S. (1997). Auditory efferents involved in speech-in-noise intelligibility. *Neuroreport*, *8*, 1779-1783.
- Gombert, J.-E. (1990). *Le développement des capacités métalinguistiques*. Paris: P.U.F.
- Gombert, J.-E., & Colé, P. (2000). Activités métalinguistiques, lecture et illettrisme. In M. Kail & M. Fayol (Eds.), *L'acquisition du langage. Le langage en développement. Au-delà de trois ans* (pp. 117-150). Paris: P.U.F.
- Goswami, U., Thomson, J., Richardson, U., Stainthorp, R., Hughes, D., Rosen, S., & Scott, S.K. (2002). Amplitude envelope onsets and developmental dyslexia: A new hypothesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, *99*, 10911-10916.

- Habib, M., Rey, V., Daffaure, V., Camps, R., Espesser, R., Joly-Portuz, B., & Démonet, J.-F. (2002). Phonological training in children with dyslexia using temporally modified speech: a three-step pilot investigation. *International Journal of Language and Communication Disorders*, *37*, 289-308.
- Hari, R., Sääskilahti, A., Helenius, P., & Uutela, K. (1999). Non-impaired auditory phase-locking in dyslexic adults. *Neuroreport*, *10*, 2347-2348.
- Hartley, D. E., & Moore, D. R. (2002). Auditory processing efficiency deficits in children with developmental language impairments. *Journal of the Acoustical Society of America*, *112*, 2962-2966.
- Heiervang, E., Stevenson, J., & Hugdahl, K. (2002). Auditory processing in children with dyslexia. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *43*, 931-938.
- Helenius, P., Uutela, K., & Hari, R. (1999). Auditory stream segregation in dyslexic adults. *Brain*, *122*, 907-913.
- Helzer, J. R., Champlin, C. A., & Gillam, R. B. (1996). Auditory temporal resolution in specifically language-impaired and age-matched children. *Perception and Motor Skills*, *3*, 1171-1181.
- Hill, N., Bailey, P. J., Griffiths, Y. M., & Snowling, M. J. (1999). Frequency acuity and binaural masking release in dyslexic listeners. *Journal of the Acoustical Society of America*, *106*, L53-L57.
- Khalifa, S., Bougeard, R., Morand, N., Veillet, E., Isnard, J., Guenot, M., Ryvlin, P., Fischer, C., & Collet, L. (2001). Evidence of peripheral auditory activity modulation by the auditory cortex in humans. *Neuroscience*, *104*, 347-358.
- Khalifa, S., & Collet, L. (1996). Functional asymmetry of medial olivocochlear system in humans. Towards a peripheral auditory lateralization. *Neuroreport*, *7*, 993-996.
- Khalifa, S., Veillet, E., & Collet, L. (1998). Influence of handedness on peripheral auditory asymmetry. *European Journal of Neuroscience*, *10*, 2731-2737.
- King, C., Warrier, C. M., Hayes, E., & Kraus, N. (2002). Deficits in auditory brainstem pathway encoding of speech sounds in children with learning problems. *Neuroscience Letters*, *319*, 111-115.
- Koch, D. B., McGee, T. J., Bradlow, A. R., & Kraus, N. (1999). Acoustic-phonetic approach towards understanding neural processes and speech perception. *Journal of the American Academy of Audiology*, *10*, 304-318.
- Kraus, N., McGee, T. J., Carrell, T. D., Zecker, S. G., Nicol, T. G., & Koch, D. B. (1995). Auditory neurophysiologic responses and discrimination deficits in children with learning problems. *Science*, *273*, 971-973.

- Kujala, T., Karma, K., Ceponiene, R., Belitz, S., Turkkila, P., Tervaniemi, M., & Näätänen, R. (2001). Plastic neural changes and reading improvement caused by audiovisual training in reading-impaired children. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 58, 10509-10514.
- Kujala, T., Myllyviita, K., Tervaniemi, M., Alho, K., Kallio, J., & Näätänen, R. (2000). Basic auditory dysfunction in dyslexia as demonstrated by brain activity measurements. *Psychophysiology*, 27, 262-266.
- Lecocq, P. (1991). *Apprentissage de la lecture et dyslexie*. Bruxelles: Mardaga.
- Lefavrais, P. (1967). *Le test de l'Alouette*. Paris: ECPA.
- Lieberman, A. M., Cooper, F. S., Shankweiler, D. P., & Studdert-Kennedy, M. (1967). Perception of the speech code. *Psychological Review*, 74, 431-461.
- Lieberman, A. M., Harris, K. S., Hoffman, H. S., & Griffith, B. C. (1957). The discrimination of speech sounds within and across phoneme boundaries. *Journal of Experimental Psychology*, 54, 358-368.
- Lieberman, I., & Shankweiler, D. (1985). Phonology and the problems of learning to read and write. *Remedial and Speech Education*, 6, 8-17.
- Lundberg, I., & Høien, T. (1990). Patterns of information processing skills and word recognition strategies in developmental dyslexia. *Scandinavian Journal of Educational Research*, 34, 231-240.
- Lundberg, I., Olofsson, A., & Wall, S. (1980). Reading and spelling skills in the first school years predicted from phonemic awareness in preschool children. *Reading Research Quarterly*, 23, 263-284.
- Manis, F. R., McBride-Chang, C., Seidenberg, M. S., Keating, P., Doi, L. M., Munson, B., & Petersen, A. (1997). Are speech perception deficits associated with developmental dyslexia? *Journal of Experimental Child Psychology*, 66, 211-235.
- Mann, V. A., & Liberman, I. Y. (1984). Phonological awareness and verbal short-term memory. *Journal of Learning Disabilities*, 17, 592-599.
- McAnally, K. L., & Stein, J. F. (1996). Auditory temporal coding in dyslexia. *Proceedings of the Royal Society, London, B* 263, 961-965.
- McArthur, G. M., & Hogben, J. H. (2001). Auditory backward recognition masking in children with a specific language impairment and children with a specific reading disability. *Journal of the Acoustical Society of America*, 109, 1092-1100.
- McCroskey, R. L., & Kidder, H. C. (1980). Auditory fusion among learning disabled, reading disabled, and normal children. *Journal of Learning Disabilities*, 13, 69-76.
- Menell, P., McAnally, K. I., & Stein, J. F. (1999). Psychophysical sensitivity and physiological response to amplitude modulation in adult dyslexic listeners. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, 42, 797-803.

- Mezernich, M. M., Jenkins, W. M., Johnston, P., Schreiner, C., Miller, S. L., & Tallal, P. (1996). Temporal processing deficits of language impaired children ameliorated by training. *Science*, 271, 77-81.
- Mody, M., Studdert-Kennedy, M., & Berdy, S. (1997). Speech perception deficits in poor readers: auditory processing or phonological coding? *Journal of Experimental Child Psychology*, 64, 199-231.
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9, 97-113.
- Reed, M. A. (1989). Speech perception and the discrimination of brief auditory cues in reading-disabled children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 48, 270-292.
- Rosen, S., & Mangarini, E. (1999). The relationship between speech and nonspeech auditory processing in children with dyslexia. *Speech, Hearing and Language: Work in Progress*, 11, 160-186.
- Schulte-Körne, G., Deinell, W., Bartling, J., & Remschmidt, H. (1998). Role of auditory temporal processing for reading and spelling disability. *Perception and Motor Skills*, 86, 1043-1047.
- Serniclaes, W., Sprenger-Charolles, L., Carre, R., & Démonet, J.-F. (2001). Perceptual discrimination of speech sounds in developmental dyslexia. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, 44, 384-399.
- Sprenger-Charolles, L., Lacert, P., Colé, P., & Serniclaes, W. (1999). Défis phonologiques et métaphonologiques chez des dyslexiques phonologiques et de surface. *Rééducation Orthophonique*, 197, 25-52.
- Stanovitch, K. E. (1988). The right and wrong places to look for the cognitive locus of reading disability. *Annals of Dyslexia*, 38, 154-177.
- Stanovich, K. E., Cunningham, A. E., & Cramer, B. R. (1984a). Assessing phonological awareness in kindergarten children: issues of task comparability. *Journal of Experimental Child Psychology*, 38, 175-190.
- Stanovich, K. E., Cunningham, A. E., & Freeman, L. (1984b). Intelligence, cognitive skills and early reading progress. *Reading Research Quarterly*, 19, 278-303.
- Stein, J. F., & McAnally, K. (1995). Auditory temporal processing in developmental dyslexics. *Irish Journal of Psychology*, 16, 220-228.
- Talcott, J. B., Witton, C., McLean, M. F., Hansen, P. C., Rees, A., Green, G. G. R., & Stein, J. F. (2000). Dynamic sensory sensitivity and children's word decoding skills. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 97, 2952-2957.
- Tallal, P. (1980). Auditory temporal perception, phonics, and reading disabilities in children. *Brain and Language*, 9, 192-198.
- Tallal, P., & Stark, R. (1981). Speech acoustic-cue discrimination abilities of normally developing and language-impaired children. *Journal of the Acoustical Society of America*, 69, 568-574.

- Tallal, P., Miller, S., Bedi, G., Byma, G., Wang, X., Nagarajan, S., Schreiner, C., Jenkins, W. M., & Mezernich, M. M. (1996). Language comprehension in language-learning impaired children improved with acoustically modified speech. *Science*, *271*, 81-84.
- Van Ingelghem, M., van Wieringen, A., Wouters, J., Vandenbussche, E., Onghena, P., & Ghesquière P. (2001). Psychophysical evidence for a general temporal processing deficit in children with dyslexia. *Neuroreport*, *12*, 1-4.
- Veillet, E., Bazin, F., & Collet, L. (1999). Objective evidence of peripheral auditory disorders in learning-impaired children. *Journal of Audiology and Medicine*, *8*, 18-29.
- Veillet, E., Georgieff, N., Philibert, B., Dalery, J., Marie-Cardine, M., & Collet, L. (2001). Abnormal peripheral auditory asymmetry in schizophrenia. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, *70*, 88-94.
- Wagner, R. K., & Torgesen, I.K. (1987). The nature of phonological processing and its causal role in the acquisition of reading skills. *Psychological Bulletin*, *101*, 192-212.
- Wimmer, H. (1993). Characteristics of developmental dyslexia in a regular writing system. *Applied Psycholinguistics*, *14*, 1-33.
- Wimmer, H. (1996). The early manifestation of developmental dyslexia: Evidence from German children. *Reading and Writing: An Interdisciplinary Journal*, *8*, 171-188.
- Wimmer, H., Landerl, K., Linortner, R., & Hummer, P. (1991). The relationship of phonemic awareness to reading acquisition: More consequence than precondition, but still important. *Cognition*, *40*, 219-249.
- Witton, C., Stein, J. F., Stoodley, C. J., Rosner, B. S., & Talcott, J. B. (2002). Separate influences of Acoustic AM and FM sensitivity on the phonological and decoding skills of impaired and normal readers. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *14*, 866-874.
- Witton, C., Talcott, J. B., Hansen, P. C., Richardson, A. J., Griffiths, T. D., Rees, A., Stein, J. F., & Green, G. G. R. (1998). Sensitivity to dynamic auditory and visual stimuli predicts nonword reading ability in both dyslexic and normal readers. *Current Biology*, *8*, 791-797.
- Wright, B. A., Lombardino, L. D., King, W. M., Puranik, C. S., Leonard, C. M., & Mezernich, M. M. (1997). Deficits in auditory temporal and spectral resolution in language-impaired children. *Nature (London)*, *387*, 176-178.