

> Dossier

Troubles centraux de l'Audition : l'enfant

7 Trouble du Traitement Auditif chez les enfants présentant un Trouble Spécifique du Langage

Evelyne VEUILLET, Hung THAI-VAN

24 Troubles centraux de l'audition dans l'autisme

Nicole BRUNEAU, Marie GOMOT, Frédérique BONNET-BRILHAULT,
Catherine BARTHÉLÉMY

28 Apports de l'imagerie cérébrale dans l'exploration d'un trouble central tel que l'autisme

Arnaud COEZ

32 Les troubles auditifs centraux chez les jeunes enfants

Laurent DEMANEZ, Jean-Pierre DEMANEZ

39 Remédiation des troubles auditifs centraux chez les enfants

Marie-Pierre MASQUELIER

Troubles du Traitement Auditif

chez les enfants présentant un Trouble Spécifique du Langage



Après un premier tome, plutôt théorique, sur le Traitement Auditif (TA) et ses moyens d'exploration, ce deuxième tome dans la trilogie des Cahiers de l'Audition consacré aux processus auditifs (centraux) va être centré sur le trouble du traitement auditif (TTA) chez l'enfant. Ce chapitre va plus particulièrement faire un point des connaissances sur le TTA en relation avec d'autres types de déficits, à savoir ceux rencontrés chez les enfants avec Troubles d'Apprentissage et plus particulièrement les troubles spécifiques du langage (TSL) oral (dysphasie) et écrit (dyslexie développementale).

Rappelons que selon l'ASHA (2005) ¹, le terme de TTA est utilisé pour décrire des difficultés variées dans la localisation, la discrimination, la reconnaissance et l'extraction de messages auditifs, plus particulièrement en milieu peu favorable d'écoute (bruit de fond, locuteurs multiples...). Ce trouble s'observe chez des sujets sans déficience mentale et qui, testés dans des conditions aussi peu écologiques que peut être une cabine insonorisée, présentent des seuils auditifs normaux témoignant d'un appareil auditif périphérique parfaitement fonctionnel. Sa prévalence exacte reste à ce jour mal connue. D'abord estimée à 2-3% par une étude américaine (1), une étude britannique plus récente l'évalue à 7% (2). Le concept de TTA est ancien (3) mais a réellement pris son essor dans les années 70-80, en parallèle avec l'intérêt sociétal grandissant pour les retards d'acquisition du langage, eux-mêmes associés à des difficultés scolaires. Son diagnostic est difficile et se complique du fait qu'il se révèle au travers d'une large variété de difficultés persistantes d'écoute (4) et de nombreux désordres de la communication, très souvent présents chez des sujets avec troubles d'apprentissage scolaires et qui sont exacerbés dans des conditions acoustiques défavorables (5).

Quels sont les signes comportementaux devant faire suspecter l'existence d'un TTA chez l'enfant ?

Un enfant avec un TTA :

- a du mal à prêter attention à ce qu'il entend et présente des difficultés pour mémoriser une information présentée oralement, la conséquence étant des difficultés pour suivre des consignes orales, surtout multiples ;
- est facilement distrait ou anormalement gêné par des

bruits venant de l'environnement (« bruit de fond » intense ou apparaissant brutalement) ;

- présente des difficultés pour converser dans des environnements bruyants (magasins, restaurants, voiture...) mais se sent plus à l'aise dans le calme ;
- est gêné pour suivre les conversations, plus particulièrement en présence de plusieurs locuteurs adoptant alors une attitude passive dans la communication ;
- n'est jamais certain de ce qu'il entend et questionne souvent « Quoi ou Hein ? » ;
- présente une lenteur dans ses réponses orales qui sont par ailleurs souvent inappropriées ;
- présente des difficultés pour apprendre des comptines ou des chansons et de faibles compétences en musique ;
- présente des problèmes pour lire, épeler ;
- présente des résultats scolaires faibles en français (lecture, écriture) et en mathématiques (tables de multiplication, résolution de problèmes) ;
- présente des problèmes de comportement.

Ces enfants, présentant un tableau clinique de TTA sont jugés par leurs enseignants comme de faibles auditeurs surtout en présence de bruit (6).

A la lecture de cette liste, qui précisons-le n'est ni hiérarchisée par ordre d'importance des symptômes, ni exhaustive, il est évident que parents et enseignants jouent un rôle primordial dans la détection d'un TTA chez l'enfant. Mais dans nos contrées européennes (et surtout francophones), ce trouble n'est que rarement recherché en première intention. En effet, face à un enfant dont les difficultés scolaires persistent, on va d'abord se poser la question de l'existence d'un trouble « dys » comme par exemple une dysphasie (trouble spécifique du langage oral), une dyslexie (trouble spécifique de la lecture), une dysorthographe (trouble spécifique de l'orthographe), une dyspraxie (troubles psychomoteurs), une dyscalculie (trouble spécifique du calcul ou des mathématiques) dans un contexte ou non de trouble déficitaire de l'attention sans ou avec hyperactivité. La question alors posée est donc celle de l'existence d'un trouble spécifique d'apprentissage (TSA).

Ce terme, proposé pour la 1^{ère} fois par l'équipe du psychologue Samuel Kirk dans les années 1980 (7), rend compte d'une carence liée au traitement de l'information. Un TSA se manifeste par des retards de développement ou par des difficultés dans différents domaines comme la lecture (lente et avec beaucoup d'inexactitudes), l'écriture, l'orthographe, le calcul, l'attention, la mémoire, le raisonnement, la coordination, la communication, la sociabilité mais également la maturité affective.

Les problèmes découlant d'un TTA et d'un TSA ont beaucoup de points en commun, ce qui rend possible leur co-existence (5), d'ailleurs reconnue par l'ASHA (2005) comme complexifiant le diagnostic différentiel (8). Or lorsque les enfants sont évalués au moyen de batteries de tests recommandées par l'ASHA (2005), une prévalence

**Evelyne VEUILLET,
Hung THAI-VAN**

Centre de Recherche en
Neurosciences de Lyon,
INSERM U1028, CNRS
UMR 5292, Université
Lyon 1 – Université de
Lyon – Groupe Parole
Audiologie Communi-
cation Santé (PACS),
Service d'Audiologie
et d'Explorations
Orofaciales, Pavillon U,
Hôpital Edouard Herriot,
Place d'Arsonval, 69437
Lyon Cedex 03.

¹ Selon l'ASHA. (2005) (Central) Auditory Processing Disorders [technical report]. Available from www.asha.org/policy: American Speech Language Hearing Association construit à partir d'un rapport technique (ASHA Taskforce on Central Auditory Processing Consensus Development (1996) Central auditory processing: Current status of research and implications for clinical practice. Am J Audiol 5: 41-54: un TTA se définit comme des problèmes dans au moins un des phénomènes comportementaux auditifs suivants : la localisation dans l'espace et la latéralisation du son, la discrimination auditive, la reconnaissance de configurations auditives, la réponse aux aspects temporels du son (intégration, discrimination, classement, masquage) et l'extraction de l'information auditive d'environnements acoustiques défavorables (par ex. bruit de fond ou multiples orateurs).



élevée de difficultés de langage oral et/ou écrit est rapportée parmi les enfants diagnostiqués comme ayant un TTA (1), et à l'inverse en présence de dyslexie par exemple, plus de 50% des enfants échouent à au moins 2 tests et tous à au moins un test (voir revue pour revue (9)). Ces co-morbidités ont été confirmées par la suite chez l'adulte (10) mais aussi chez l'enfant pour qui il a été observé que sur 23 enfants dyslexiques, tous échouaient au moins à l'une des épreuves mesurant les processus auditifs (11). Mais ces pourcentages de co-occurrence entre TTA et TSL varient d'une étude à l'autre, sans doute à cause de l'hétérogénéité des populations. Récemment, il a été par exemple rapporté que sur 68 enfants âgés entre 7 et 12 ans, suspectés de TTA, les 47% qui sont effectivement atteints présentent un trouble additionnel du langage, seulement 4% étant des « purs TTA » (12). Une autre étude rapporte que sur 127 enfants présentant un TSA, 43,3% présentent un TTA dont 25% sont dyslexiques (13). Deux études publiées dernièrement viennent confirmer l'existence de cette co-morbidité. L'une compare deux groupes d'enfants (avec TTA vs avec dyslexie) au niveau du profil psychométrique (lecture, QI non verbal...) et auditif (batterie de tests de TA). Il apparaît que plus de la moitié des enfants (13 sur 25) avec TTA remplissent les critères diagnostiques de la dyslexie, de la dysphasie ou des deux ; inversement les enfants du groupe des dyslexiques ont des scores similaires à ceux des enfants avec TTA aux épreuves de traitement auditif (14). Cela veut donc dire que les deux populations ont bien des points communs. Toutefois, les enfants avec TTA tendent à avoir les problèmes les plus sévères, certains d'entre eux présentant des traits autistiques comme une indifférence ou au contraire une hypersensibilité à certains sons. Dans l'autre, il est rapporté qu'en dépit de diagnostics cliniques différents, les enfants avec TTA présentent des profils neuropsychologiques et audiologiques semblables à ceux présentant un TSL oral (15). Ainsi TTA et TSL oral et/ou écrit co-existent, mais en revanche aucun lien n'existe entre les compétences auditives centrales et habiletés en lecture chez l'enfant se développant normalement, cela suggérant que les outils d'évaluations des processus auditifs ne permettent pas de prédire le développement de la lecture (16).

Quels sont les déficits auditifs présents chez les enfants avec Trouble Spécifique du Langage (TSL) ?

1

Etudes comportementales

1. Déficits de traitement des stimuli auditifs non verbaux

L'explosion des recherches consacrées aux déficits du traitement auditif chez les enfants avec TSL a donc eu lieu dans les années 70-80. Elle a été initiée par une psycholinguiste américaine, Paula Tallal, qui a été la première à émettre l'hypothèse selon laquelle un aspect spécifiquement temporel du TTA serait sous-jacent au déficit du langage. Tout d'abord, il a été mis en évidence, chez 12 enfants présentant des difficultés d'acquisition du langage oral (qualifiés d'aphasiques) des déficits lors de tâches de « répétition »² (ou juge-

ment d'ordre temporel (JOT)) de 2 sons non verbaux consistant en sons complexes se différenciant par leur fréquence fondamentale (100 vs 305 Hz) (17). Ces enfants font significativement plus d'erreurs que les enfants contrôles en présence de sons courts (75 ms) plutôt que longs (250 ms), et/ou lorsque l'intervalle inter-stimulus (IIS) est court (150 ms) plutôt que long (300 ms). Puis ce déficit a été retrouvé chez des enfants dyslexiques qui se sont révélés être déficitaires pour discriminer et ordonner ces mêmes types de stimuli brefs séparés par de courts IIS de 40 ms, tandis que leurs performances se normalisent lorsque ces IIS sont allongés à 500 ms (18). Alors que seulement 9 des 20 enfants dyslexiques réussissent moins bien que les enfants normolecteurs pour les IIS courts (< 305 ms) et qu'en plus certains enfants contrôles sont également en échec, il a été toutefois conclu, et renforcé entre temps (19), que les enfants dyslexiques présentent un déficit pour traiter des stimuli brefs qui se succèdent rapidement comme c'est le cas des événements acoustiques transitoires rapides (20). A ces différences entre groupes, s'ajoute l'existence de corrélations significatives entre ces compétences auditives mesurées lors de ces tâches non verbales et les habiletés en lecture. Il a donc été suggéré l'existence, chez ces enfants avec TSL d'une limite anormalement basse de vitesse de traitement de l'information auditive qui impacterait le traitement phonologique et contribuerait aux problèmes d'acquisition de la lecture. Il s'agit de la théorie bien connue sous le nom de « déficit du Traitement Auditif Temporel (TAT) rapide » (voir pour revues 21 et 22). Il fut par la suite rendu compte du rôle néfaste d'un tel déficit sur le développement précoce du langage et son rôle prédictif sur les performances langagières ultérieures. Ces faibles compétences de discrimination, spécifiques aux stimuli non verbaux se succédant trop rapidement, et leur lien avec les déficits de conscience phonologique ont été ultérieurement retrouvés chez des sous-groupes (entre 30-90%) d'enfants dyslexiques (voir pour plus récente étude (23). Ces corrélations existeraient de l'enfance jusqu'à l'âge adulte et celles mesurées en période préscolaire prédiraient de manière significative la précision en lecture de mots au 1^{er} cycle (Grade I).

Mais actuellement, présenter, comme l'a fait Tallal (2004) (24), cette incapacité à résoudre les sons brefs se succédant rapidement comme la cause de la dyslexie serait bien réducteur et beaucoup de travaux remettent en question cette théorie. Déjà parce que même si de faibles performances aux tests de TAT caractérisent certains enfants avec TSL, ils sont aussi nombreux à parfaitement réussir ces épreuves (25) laissant à penser que ce déficit n'est présent que dans des sous-groupes d'enfants. Ces différences ont même parfois été qualifiées de « marginalement significatives » et comme n'étant pas significativement plus marquées quand l'IIS diminue (26). De plus, il existe d'importants chevauchements entre les populations, certains enfants pourtant normolecteurs présentant des performances moins bonnes que les enfants avec TSL et inversement (voir pour étude récente (27). Non seulement la spécificité est faible mais en plus, il y a un manque crucial de reproductibilité et de réplication des résultats pouvant s'expliquer par une forte hétérogénéité des populations non seulement en taille mais aussi par les caractéristiques cliniques des sujets inclus. Ces résultats, finalement très inconsistants ont conduit à penser qu'un TAT déficitaire n'impacte pas systématiquement les compétences langagières et que des déficits lors d'épreuves de jugement de similarité et de classement de sons ne caractérisent pas de manière universelle les individus avec TSL. A ce jour, il est certain qu'ils ne sont certainement pas la seule cause

² Tâche de répétition : c'est la version modifiée d'une épreuve de jugement d'ordre temporel (JOT). Une tâche de JOT consiste d'abord à présenter isolément deux stimuli différents (1 et 2) que le sujet identifie en donnant sa réponse par appui sur des boutons. Puis les deux sons sont présentés par paires à des ISI variables et le sujet doit indiquer l'ordre de présentation de ces deux sons par appui sur ces boutons. A la différence d'une tâche standard de JOT où seulement deux ordres de présentation des stimuli sont proposés (1-2 ou 2-1), une tâche de répétition comprend 4 types de présentations (1-2 ;

2-1 ; 1-1 ; 2-2), ce qui permet de mesurer simultanément les capacités de jugement d'ordre et celles de discrimination de différence entre les stimuli.



à l'origine des problèmes rencontrés par l'enfant dysphasique et/ou dyslexique (27). D'ailleurs les liens significatifs entre les performances mesurées lors de tâches phonologiques ou de lecture et le TAT ne sont pas toujours retrouvés et pourraient ne concerner que les enfants présentant une dyslexie qui a été précédée d'un déficit de langage oral. De même, le caractère prédictif de ce déficit sur les compétences ultérieures en lecture a également été remis en question ce qui argumente en faveur de la conclusion suivante : « le déficit auditif n'est une cause ni nécessaire, ni suffisante d'un déficit langagier » (28).

Toutefois, d'autres mesures psychoacoustiques sont en faveur d'anomalies du TAT chez l'enfant avec TSL. En tout premier lieu, il y a celles mettant en jeu les capacités de masquage rétrograde. Des déficits lors de cette épreuve sont très certainement imputables à des dysfonctionnements intéressant les mêmes processus auditifs que ceux impliqués dans les tests utilisés par l'équipe Tallal. En effet, dans une épreuve de répétition durant laquelle deux sons sont administrés successivement, il est probable que le second son interfère avec le premier et cela d'autant plus que l'IIS est bref. Or d'importantes anomalies, spécifiques à la condition de masquage rétrograde mais non présentes dans les conditions de masquage antérograde ou simultanée ont été rapportées chez l'enfant dysphasique (29) mais aussi, même si les différences sont moins nettes, chez l'enfant dyslexique (30). En second lieu, certaines études ont consisté à comparer les seuils de discrimination fréquentielle entre des enfants avec et sans trouble du langage. Cette mesure repose sur des mécanismes neuronaux de verrouillage de phase. Or ces seuils ont été trouvés comme étant anormalement élevés chez l'enfant dyslexique (31 ; 32) mais aussi dysphasique (33 ; 34 ; 35). Mais ici encore, tous les enfants ne présentent pas ce déficit de discrimination fréquentielle (par exemple 62,5% chez l'enfant dyslexique (36) et d'importantes variations de pourcentages sont relevées chez les enfants dysphasiques (0% (37 ; 27) mais 40% selon d'autres études (38). L'absence de déficit, parfois rapportée chez l'adulte dyslexique questionne sur la spécificité de la mesure : les sujets présentent-ils un TAT ou des difficultés pour réaliser cette tâche ?

Cependant, si l'on veut aborder le plus exhaustivement possible le TTA dans les TSL, il est indispensable de rendre compte des résultats d'études psychoacoustiques réalisées ces dernières années. Il faut toutefois conserver une attitude critique par rapport d'une part à la proportion d'enfants déficitaires et d'autre part aux compétences effectivement mesurées. Considérons dans un premier temps les résultats obtenus en utilisant la méthode la plus simple de mesure des capacités de TAT : celle au cours de laquelle un stimulus (un son pur par exemple) est présenté en étant interrompu par une période de silence dont on fait varier la durée. Le sujet a pour consigne d'indiquer lorsqu'il perçoit une interruption ou trou « gap » dans le signal ; il s'agit de la procédure dite du « gap-test » permettant de mesurer la plus petite interruption de signal que le sujet perçoit. C'est avec cette procédure que deux populations d'enfants (normolecteurs vs dyslexiques) ont été comparées et qu'il a été trouvé des seuils significativement plus élevés chez 90% des enfants dyslexiques (39). Mais cela n'a pas toujours été retrouvé que ce soit chez l'adulte ou l'enfant. Pour expliquer ces contradictions, diverses hypothèses ont été formulées : existence d'un délai imposé par la maturation des voies auditives (40) ou incapacité des sujets à réaliser la tâche de détection de gap (41). Par ailleurs, si certains enfants avec TSL ont des difficultés pour traiter les stimuli brefs et rapprochés, ils peuvent aussi rencontrer des difficultés lors d'épreuves durant lesquelles les sons présentés ont des variations lentes. Ainsi certains d'entre eux présentent un déficit de résolution

temporelle en présence de stimuli auditifs contenant des indices acoustiques temporels dynamiques à variation lente comme par exemple la profondeur de modulation d'amplitude (42) mais aussi de durée (43) ainsi que de temps de montée de l'enveloppe du son (44 ; 43). Mais des différences se dessinent en fonction de la langue (voir pour revue (45)). D'autres preuves de l'existence de relation entre la sensibilité aux paramètres acoustiques temporels « dynamiques » et l'acquisition du langage ont été apportées par les études mesurant les capacités de détection des sons modulés en fréquence (FM). Un premier travail conduit chez des enfants dont le langage se développe normalement a d'abord fait état d'une relation modeste mais significative entre la sensibilité auditive à la FM à bas taux (2 Hz) et les capacités en lecture (46). Puis il a été observé que les enfants dyslexiques sont moins sensibles à la FM à 2 et 40 Hz que des enfants contrôles alors qu'aucune différence n'est observée entre les deux groupes à 240 Hz (31 ; 47). Toutefois plus récemment, non seulement les moindres capacités à détecter la FM à 2 et 20 Hz n'ont pas été retrouvées chez tous les enfants dyslexiques mais le lien entre sensibilité à la FM et lecture est également remis en question (48). Enfin, aucune de ces compétences auditives temporelles, dont en particulier la détection du gap et de la FM, ne semble pouvoir permettre de dépister les jeunes enfants à risque de dyslexie (49).

Ainsi, ces diverses données, fortement contradictoires plaident en faveur d'un rôle plutôt assez limité du traitement auditif dit « de bas niveau » ou sensorimoteur dans les troubles d'acquisition du langage, en particulier écrit. D'ailleurs certaines études ne trouvent pas de TTA chez l'enfant avec TSA (28 ; 50) et les polémiques sont plus particulièrement vives en ce qui concerne l'enfant dyslexique (51). Il a été rapporté l'existence d'un TTA chez 30 à 40% des sujets adultes dyslexiques français (52). Des estimations plus récentes concernant plus spécifiquement les enfants dyslexiques font état de taux compris entre 25 et 30 % (48 ; 53). Récemment, il a été observé que lors d'une tâche de ségrégation de flux auditifs où 2 sons purs (1 et 4 kHz) sont présentés alternativement, 92% des enfants dyslexiques avec déficit phonologique présentent des seuils plus élevés que les enfants normolecteurs (54). Cela suggère qu'il existe, dans la modalité auditive, une plus forte incidence des déficits temporels attentionnels chez l'enfant dyslexique qui souffrirait d'une intégration perceptive séquentielle plus lente. Ce déficit est qualifié de déplacement attentionnel ralenti qui, chez l'adulte dyslexique, pourrait être causé par un allongement de la fenêtre attentionnelle (55).

Est-il possible, dans l'état actuel de nos connaissances acquises au travers de ces diverses études comportementales, d'en conclure à l'existence possible d'un TTA chez les enfants avec TSL ? Si l'on se réfère aux travaux de ces 25 dernières années, il apparaît que très vite, face à l'inconstance des données, de fortes critiques ont été émises à l'encontre de cette théorie auditive temporelle presque exclusivement formulée à partir d'observations d'enfants soumis à des tâches psychoacoustiques reposant sur des épreuves comportementales complexes à forte charge attentionnelle ou mnésique. Plus récemment, la présence inconstante de ces déficits a été réinterprétée en tenant compte de cette forte demande cognitive et il a été suggéré que les enfants, en particulier dyslexiques, seraient incapables de tirer un bénéfice de la répétition du stimulus (56). Actuellement, on se demande de plus en plus si les faibles compétences auditives observées chez certains enfants présentant un trouble d'apprentissage ne seraient pas surtout révélatrices d'une incapacité générale à réaliser les tests plus qu'à un déficit spécifiquement temporel, voire même auditif (57).



2. Déficit de traitement des signaux de parole

A. Dans le silence

Il n'est pas question ici de prendre part aux débats, allant parfois aux polémiques qui font rage au sujet de la spécificité des mécanismes sous-jacents aux déficits observés dans certains TSA, mais nous devons pourtant en faire état. S'opposent d'un côté les tenants d'une atteinte exclusivement de nature linguistique (58) avec un trouble spécifique à la parole et de l'autre ceux pour qui les déficits linguistiques seraient des manifestations en surface de déficits sensoriels/perceptifs plus basiques dont parmi eux, certains abordés précédemment. Il est évident que ces troubles perceptifs peuvent compromettre la perception de la parole qui rappelons-le se compose d'unités élémentaires ou phonèmes, cartes représentatives de figures ou indices acoustiques (sons) comportant des variations temporelles et/ou spectrales plus ou moins rapides (59). Ainsi, pour identifier correctement un phonème, il faut, entre autres, être capable de déterminer la forme spectrale, de détecter et discriminer les modulations d'amplitude et de fréquence, de faire de la résolution temporelle (détecter des sons brefs ou traiter des changements parfois très rapides (sur une période de quelques millisecondes voire moins) mais aussi de traquer les changements plus lents présents dans le signal. Ainsi certaines distinctions linguistiques essentielles telles que la différence entre 2 consonnes vont dépendre des capacités à traiter les changements spectro-temporels rapides. C'est le cas par exemple pour la consonne /b/ versus /d/, en opposition sur le lieu d'articulation et dont la différenciation linguistique nécessite de distinguer des changements rapides de fréquence au niveau des pics d'énergie acoustique (i.e les transitions formantiques) se mesurant en dixième de millisecondes. Et c'est justement pour traiter ce type de phonèmes que certains enfants avec TSA sont plus particulièrement en difficulté. Ainsi en 1974, Tallal et Piercy (60) ont été de nouveau les premiers à décrire l'incapacité de certains enfants avec difficultés d'acquisition du langage oral à ordonner temporellement deux syllabes synthétiques /ba/ vs /da/ séparées par un IIS court, ne différenciant plus des témoins pour des IIS plus longs. Ils montrèrent par la suite que ces enfants présentent des performances tout à fait normales lors d'épreuves de jugement d'ordre temporel (JOT) utilisant des voyelles ou bien des consonnes avec des transitions formantiques allongées (61). Ces mêmes difficultés ont été retrouvées chez l'enfant dyslexique en présence de syllabes Consonnes-Voyelles (CV) se succédant rapidement (18 ; 19) avec un effet bénéfique de l'allongement des formants (62). Ces résultats ont argumenté en faveur d'une incapacité (ou insuffisance) des voies auditives à traiter les composantes les plus brèves de la parole chez les enfants avec TSL. Des travaux ultérieurs ont remis en question, en particulier dans la dyslexie, l'hypothèse de l'existence de difficultés de traitement auditif d'ordre temporel au profit de la présence d'un déficit parole spécifique (63). Plus récemment, il a été confirmé que la moitié des enfants dyslexiques sont déficitaires lors d'épreuves utilisant les syllabes /ba-/pa/ (23). Les études qui ont depuis recherché l'existence de ce type de déficit perceptif, que Tallal et ses collaborateurs ont qualifié de déficit auditif général, ont surtout consisté à mesurer la manière dont ces enfants catégorisent et/ou discriminent des sons de parole se différenciant entre eux au niveau d'un indice acoustique que l'on fait artificiellement varier par pas égal. Il s'agit des épreuves dites de « perception catégorielle » durant lesquelles les sujets ne perçoivent pas séparément chaque signal mais les groupes en catégories. Cette catégorisation repose sur le fait qu'en règle générale les sujets tendent à ignorer les changements acoustiques qui sont phonétiquement non pertinents (« intra-catégorie ») mais à être beaucoup plus sensibles aux différences qui correspondent à une distinction ou

un contraste phonémique (« inter-catégorie ») (64). Ce type de procédure est bien adapté pour étudier la sensibilité à certains contrastes minimaux de parole comme par exemple le voisement (ex. : /ba-/pa/ mais aussi le lieu d'articulation (ex. : /ba-/da/). Elle implique un traitement de type sous-lexical mettant en jeu les entrées sensorielles auditives (perception du phonème) mais également visuelles (pointage du symbole écrit ou graphème). Ce phénomène de catégorisation suggère que l'expérience perceptive de la parole est dirigée par les aspects phonétiques de plus haut niveau plutôt que par les propriétés acoustiques physiques de plus bas niveau. Concernant les enfants dyslexiques, il a été observé qu'ils tendent à présenter des catégories phonémiques imprécises avec des réponses plus aléatoires (19 ; 65 ; 66 ; 67 ; 68 ; 69). Ils sont plus enclins à confondre les signaux se situant de part et d'autre de la frontière inter-catégorielle mais à différencier ceux qui se situent à l'intérieur d'une même catégorie (68 ; 70 ; 71 ; 72) laissant supposer qu'ils prêtent plus attention à des cibles acoustiques non pertinentes phonétiquement que les enfants normo-lecteurs. La présence de tels déficits vient alimenter les nombreuses preuves en faveur d'une atteinte phonologique (73), hypothèse la plus probable dans la dyslexie (voir par exemple (74)). L'apprentissage en particulier de la lecture peut-être est conçu comme reposant sur l'établissement, le renforcement et l'automatisation des associations entre les représentations mentales des phonèmes et des graphèmes. Dans ce processus dit de « recodage phonologique », il est primordial de construire des représentations les plus stables possibles de la parole basées sur le son. Selon cette théorie phonologique, si les représentations phonémiques sont dégradées ou peu accessibles, les correspondances graphèmes - phonèmes seront instables et mal automatisées ce qui peut avoir pour conséquence d'entraver l'acquisition de la lecture. Nombreuses sont les études qui, en utilisant par exemple des tâches de « conscience phonologique » qui testent les capacités du sujet à prêter attention aux phonèmes et à les manipuler consciemment, celles de mémoire verbale à court terme et de dénomination rapide, ont ainsi montré cette incapacité des dyslexiques à segmenter les mots parlés en phonèmes (voir pour revues (75 ; 76)).

Mais ici à nouveau, ces déficits observés lors d'épreuves de perception catégorielle ne sont pas toujours retrouvés et pour certains auteurs ne concerneraient que des sous-groupes d'enfants dyslexiques (environ 30% d'entre eux) parfois uniquement ceux qui ont concomitamment des troubles du langage oral. Très récemment, une étude a montré que les enfants avec TSL oral sans dyslexie sont les seuls à présenter des déficits de perception catégorielle et plus particulièrement dans le bruit (77).

B. En situation compétitive d'écoute

Comme nous l'avons vu, l'un des signes cliniques du TTA est une gêne d'écoute et/ou des difficultés de concentration en milieu bruyant pouvant pénaliser l'enfant en situation scolaire.

En effet, la salle de classe est souvent un milieu peu favorable pour l'écoute (nombreux bavardages, bruits environnementaux constants et/ou aléatoires). Il a ainsi été montré que le bruit moyen dans une salle de classe peut atteindre 72 dBA ce qui peut réduire l'intelligibilité de la parole de 50% (78) et cela surtout dans les petites classes (79)³. Avant tout, rappelons que les compétences des

³ Bradley et Sato (2008) ont examiné la perception de mots dans le bruit chez des élèves de différents grades (1^{er}, 3^{ème} et 6^{ème}) et montrent que les rapports signal/bruit près de l'idéal (i.e des performances à 95%) correspondants à savoir respectivement +15,5 dB, +12,5 et +8,5 dB n'apparaissent qu'environ pour 20% des 1^{ers} grades, 34% des 3^{èmes} grades et 34% des 6^{èmes} grades.



enfants sont inférieures à celles des adultes en présence de bruit de fond (cf. Deggouj et Demanez, Tome1, Chapitre 3) et les difficultés sont encore plus importantes pour les enfants avec TSL. En effet, la majorité des études montrent qu'ils sont plus particulièrement vulnérables aux effets délétères du bruit (voir parmi les plus récentes études (80 ; 81 ; 82). Chez les enfants dyslexiques, ces déficits de perception dans le bruit apparaissent en dépit d'une perception normale dans le silence (83). En condition adverse d'écoute, il faut allouer des ressources auditivo-cognitives plus fortes pour comprendre la parole (84) car la redondance et la force du signal à détecter sont réduites. Il a été suggéré qu'un enfant ne traitant pas de manière robuste la parole (i.e incapable d'assigner des poids corrects à certains indices acoustiques) effectuerait un recodage phonologique peu performant de la parole dans le bruit (85). Toutefois, la relation entre conscience phonologique et perception de la parole dans des niveaux modérés de bruit vient d'être récemment remise en question chez des enfants de 5 à 7 ans se développant normalement (86).

Dans l'état actuel de nos connaissances acquises au moyen des procédures comportementales, il est bien difficile de savoir ce qui dysfonctionne chez les enfants avec TSL. Toutefois, l'atteinte ne semble pas être périphérique puisque ces enfants, comme tout sujet contrôle à audition normale, récupèrent beaucoup mieux les signaux de parole présentés dans un bruit fluctuant que ceux présentés dans un bruit stationnaire, phénomène connu sous le nom de « masking release » (83). Cela rend peu probable non seulement un déficit de résolution (temporelle ou spectrale) ou également l'existence de représentations phonologiques de mauvaise qualité mais argumente plutôt pour une « atteinte quelque part entre ces deux niveaux ». Par contre, ce que l'on sait, c'est que la détection des signaux dans le bruit est améliorée par le processus auditif d'interaction binaurale reposant sur le calcul de différences de temps entre les signaux reçus sur les 2 oreilles effectué au niveau du tronc cérébral. Or il a été observé que les enfants avec difficultés d'apprentissage liées au langage sont déficitaires dans des tâches qui impliquent un « timing » interaural précis telles que celles mesurant la différence de niveau de masquage binaural (87), la détection binaurale du pitch (36) ou la fusion binaurale (88 ; 89).

■ C. Situation compétitive d'écoute particulière : L'écoute dichotique⁴

Comme Deggouj et Demanez l'ont expliqué (voir Tome 1, chapitre 3), lors d'un test d'écoute dichotique, le sujet a pour consigne de restituer verbalement des messages sonores différents, présentés simultanément dans les deux oreilles. Ce test mesure les aptitudes de séparation et d'intégration binaurales et permet également de quantifier le degré d'asymétrie auditive en calculant la prévalence d'oreille (PO), indice indirect de différences de latéralité entre les hémisphères du cerveau lorsqu'ils sont activés par chaque oreille (90 ; 91). Divers matériel verbal peut être administré : mots, chiffres

ou syllabes Consonne-Voyelle (CV) ou CVC, phrases dans différentes conditions de rappel : attention divisée i.e le rappel libre (ou oreille non désignée) et attention dirigée (ou oreille désignée). La présentation dichotique de stimuli auditifs verbaux conduit habituellement à un avantage en faveur de l'oreille droite tout du moins en condition de rappel libre. C'est la combinaison des 2 procédures de rappel qui permet le mieux, au moins chez la personne âgée soumise à une épreuve dichotique de phrases, de dissocier les processus auditifs des processus cognitifs (la mémoire à court terme, l'attention ou la vitesse de traitement mental) dont le poids est minimisé en attention dirigée (92).⁵

Quelles sont les performances des enfants avec TSA durant cette épreuve ? On peut s'interroger sur la fiabilité d'une telle procédure demandant à des enfants avec TSL d'être attentifs, de mémoriser et de répéter du matériel verbal (93 ; 94). Toutefois, des études durant lesquelles les divers facteurs cognitifs de biais sont contrôlés permettent d'identifier, voire même catégoriser les enfants présentant un TSA (95). Les enfants dyslexiques présentent des déficits d'intégration binaurale avec des performances amoindries comparées à celles d'enfants normolecteurs du même âge (96) et des aptitudes dichotiques significativement plus faibles (97). Deux principales configurations sont décrites chez les enfants avec TSL. L'une fait état d'une forte asymétrie interaurale en faveur de l'oreille droite expliquée par des performances significativement réduites sur l'oreille gauche (voir pour résultats les plus récents (98) comme cela est classiquement décrit chez les enfants présentant un TTA (voir entre autres (13 ; 99)) et qui laisse supposer l'existence d'un transfert inter-hémisphérique altéré (100). Mais d'autres études, conduites avec des stimuli de type CV, rapportent chez l'enfant dyslexique des performances symétriques avec un avantage en faveur de l'oreille droite plus petit que la normale voire un déficit droit (96). Cette faiblesse de l'oreille droite persiste durant l'adolescence et est encore présente à l'âge adulte (101). Cela a conduit à la formulation de plusieurs hypothèses : un dysfonctionnement hémisphérique gauche, des activations excessives soit de l'hémisphère droit seul soit des deux hémisphères. L'autre configuration est celle de performances réduites dans les deux oreilles. Dans ce cas, il est souvent bien difficile d'en départager les causes : atteinte du langage, capacités intellectuelles réduites, manque de motivation ou d'attention, fatigue.

Il est clair que les côtés déficitaires lors du test dichotique sont très tributaires de la procédure avec des effets différents entre enfants dyslexiques et témoins (97). Les mécanismes attentionnels, très importants dans cette procédure (102), sont sans doute à l'origine de ces variabilités. Enfin, et concernant les dyslexiques, ceux restant en échec scolaire en dépit d'une prise en charge scolaire et orthophonique adaptée, sont plus enclins à présenter un déficit sur l'oreille droite lors d'un test dichotique sur CV où la consigne est de répéter la syllabe la mieux entendue afin de réduire l'effet de la mémoire de travail (103).

⁴ Dichotique : technique non invasive comportementale pour explorer le traitement auditif du langage (Kimura, 1967). En accord avec le modèle structurel de Kimura pour l'écoute dichotique, le REA est le résultat :

- 1- de la plus forte activation dans l'hémisphère controlatérale suite à un input auditif de matériel linguistique
- 2- la suppression de l'information transmise le long de la voie auditive ipsilatérale
- 3- la spécialisation hémisphérique gauche pour le langage chez la plupart des droitiers
- 4- la nécessité pour l'input sur l'oreille gauche d'être transféré au travers du corps calleux pour accéder à l'hémisphère gauche dominant pour le langage.

⁵ Jerger et Martin (2006) interprètent le test réalisé dans les deux conditions en décrivant chez la personne âgée 2 configurations « anormales » :

- Faibles performances uniquement dans le mode en rappel libre (Type II) : le déficit serait principalement cognitif avec des ressources attentionnelles et mnésiques et des vitesses de traitement insuffisantes pour présenter de bonnes performances quand les 2 oreilles sont sollicitées.
- Faibles en rappel libre le sont aussi en rappel dirigée (Type III) : il est alors possible que le problème soit spécifiquement auditif plutôt que cognitif puisque la diminution de la charge cognitive opérée en condition d'attention dirigée ne change rien.



Ces capacités d'intégration binaurale sont probablement importantes dans la salle de classe où l'élève doit être capable d'extraire et surtout privilégier le message oral délivré par l'enseignant. Toutefois, leurs mesures restent parfois encore difficiles à investiguer chez l'enfant dysphasique et/ou dyslexique pour lequel certains processus cognitifs sont altérés. Les techniques objectives d'exploration de la fonction auditive constituent certainement des méthodes alternatives intéressantes.

2

Etudes objectives

1. Imagerie cérébrale (cf. Tome 1, Chapitre 3 pour la méthodologie)

Les études neuroanatomiques réalisées au moyen de l'imagerie par Résonance Magnétique (IRM) chez l'enfant avec TSL (oral ou écrit) font état de réduction de volume de certaines structures cérébrales pouvant s'accompagner, comme par exemple dans la dyslexie, d'asymétries anormales plus particulièrement au niveau des lobes temporaux et pariétaux (voir pour revue (104)). Certains facteurs de risque qualifiés d'anatomiques sont évoqués et seraient liés aux performances en lecture. Parmi les anomalies, certaines sont plus particulièrement observées dans les régions cérébrales plus spécifiquement impliquées dans le traitement auditif. Ainsi par exemple chez l'enfant dyslexique, il a été montré des anomalies du planum temporale, des aires auditives du corps calleux, dans les neurones du noyau géniculé médian dans le thalamus. Ainsi, alors que la majorité (60 à 70%) des sujets normaux présente un planum temporale plus large à gauche qu'à droite, les dyslexiques tendent à présenter soit une asymétrie exagérée vers la droite soit une symétrie. Il existe toutefois de grandes contradictions dans les résultats s'expliquant par la grande hétérogénéité liée aux sujets (latéralité manuelle, déficits cognitifs, sévérité de l'atteinte...) mais également à l'existence de phénomènes de compensation. Celles-ci peuvent entraîner des asymétries soit extrêmes en faveur de l'hémisphère gauche (105) soit très fortement variables comme cela est observé chez le lecteur adulte résilient ⁶ (106). Certaines études morphologiques dissocient les anomalies en fonction du type de TSL (107 ; 121) ⁷. Enfin, il a été observé l'existence des ectopies corticales (i.e. des petits nids de neurones anormalement placés) émergeant à des étapes précoces du développement (108) ; elles pourraient affecter les régions thalamiques auxquelles elles sont connectées et être ainsi responsables des déficits du traitement temporel.

Les études de neuroimagerie fonctionnelle (voir pour revue (109)) sont en faveur, chez l'enfant à risque ou étant dysphasique d'hypoactivations dans des régions cérébrales critiques pour la perception de la parole et la conscience phonologique : cortex pariétal gauche et sulcus précentral durant l'encodage et portion insulaire du gyrus frontal inférieur durant la reconnaissance. Il est aussi rapporté un recrutement parfois excessif de certaines régions frontales et cingulaires, interprétées comme la mise en jeu de méca-

nismes compensatoires (110). Parmi les études s'intéressant à la dyslexie, certaines sont en faveur d'anomalies d'activation dans le cortex préfrontal gauche en réponse à des sons contenant des transitions rapides versus lentes (111). Tout récemment, il a été observé que durant une tâche de discrimination auditive consistant à indiquer si une paire minimale de sons (ex. /ba/ - /pa/) est identique ou différente, les enfants dyslexiques présentent des hyperactivations au niveau frontal droit et des hypoactivations dans le cortex temporal et dans le cortex pariétal inférieur gauche (112 et 113). Il est observé que ces hypoactivations co-varient avec différentes compétences comme celles de discrimination auditive mais également de conscience phonologique, de détection de mouvement visuel, d'imitation de rythmes et de réorientation de l'attention. Les nombreuses études d'IRMf pédiatriques, sont pour la plupart basées sur des tâches de décisions phonologiques reposant sur des présentations visuelles des stimuli (voir pour revue (114)) et beaucoup font état chez l'enfant dyslexique d'activations réduites dans le gyrus frontal inférieur gauche alors que l'inverse est parfois observé chez l'adulte dyslexique. Cela suggère surtout qu'avec l'âge, certains ⁸ dyslexiques instaurent une dépendance de plus en plus forte à l'égard de cette aire corticale importante pour le recodage articulo-phonatoire (115) compensant ainsi ce qui apparaît comme étant lié per se à l'étiologie de la dyslexie : le dysfonctionnement au niveau du cortex temporo-pariétal gauche où des activations réduites voire même absentes sont décrites chez le sujet dyslexique enfant comme adulte (voir pour revue (116)) sans qu'une maturation retardée ou un niveau de lecture insuffisant puissent être incriminés (117). Par ailleurs, comme nous l'avons déjà dit précédemment, la lecture aisée (fluent) reposerait sur l'association graphèmes-phonèmes. Une étude très récente d'IRMf étudiant, chez des enfants, l'intégration passive de stimuli lettres - sons de parole (associations congruentes vs non congruentes) en apportent des preuves (118). Il y est en effet rapporté, chez les enfants dyslexiques, de plus faibles activations au niveau temporal (gyrus antéro-supérieur) gauche pour le traitement des sons de parole mais surtout, en mode multi-sensoriel (i.e. audiovisuel) de stimulation. Ainsi, à la différence d'enfants normolecteurs, les dyslexiques ne présentent pas ou très peu de modulation d'activité dans le cortex temporel gauche (planum temporale/sulcus de Heschl (=cortex auditif primaire) et sulcus temporal supérieur) en fonction de la congruence audiovisuelle. De surcroît, en considérant tous les enfants, des liens significatifs sont observés entre cet effet de congruence objectif avec l'IRMf et les compétences en lecture (précision et vitesse). Cette intégration lettre-son dégradée, qui pourrait être un déficit fondamental dans la dyslexie développementale, serait déjà présente en début d'acquisition de la lecture et ne pourrait être dominée automatiquement en dépit d'années d'expérience de la lecture. A noter que ce processus déficitaire d'intégration multi-sensorielle serait également observé chez les sujets dyslexiques testés avec des stimuli non linguistiques (sons purs - flashes lumineux). Ils sont alors interprétés comme un élargissement de la fenêtre temporelle à l'intérieur de laquelle les stimuli auditifs et visuels sont groupés en une construction unitaire (119).

⁶ Un lecteur adulte résilient présente un niveau moyen de compréhension de textes en dépit de très faibles scores de décodage (lecture de non-mots) : ce sont les dyslexiques « compensés ».

⁷ Les enfants présentant à la fois des difficultés de compréhension orale et des déficits en lecture (les SLI) présentent des structures cérébrales (hémisphères cérébraux, gyri de Heschl, planum temporale et pariétal) anormalement petites et symétriques alors que les enfants présentant une dyslexie (phonologique) se caractérisent par des gyri de Heschl supplémentaires, des régions du langage plus larges et des asymétries exagérées du planum temporale.

⁸ Les deux récentes études de Heim et Coll. en 2010 (112 ; 113) montrent que chez des sujets témoins, le rôle du cortex frontal (moyen) droit semble dépendre des compétences phonologiques et pas de l'attention. Inversement, chez le sujet dyslexique et indépendamment du niveau de conscience phonologique, l'activation du gyrus frontal moyen (durant la conversion graphème-phonème) dépend des capacités du sujet à « déplacer » son attention afin de favoriser le processus de lecture.



2. Electrophysiologie : altérations des réponses corticales et sous-corticales

Les études dans lesquelles les Potentiels Evoqués Auditifs (PEA) ont été enregistrés (cf. Tome 1, Chapitre 5 pour la méthodologie) chez l'enfant à risque ou présentant un TSL sont nombreuses puisque cette technique présente, rappelons-le, à l'avantage de tester les processus auditifs sans que l'enfant n'ait à réaliser une tâche comportementale particulière, au moins pour les PEA mesurés en condition passive. Les résultats concernant les ondes tardives des PEA (ondes corticales N1 et P2) chez l'enfant dysphasique et/ou dyslexique sont mitigés. McArthur et Coll. (2009) (120), qui ont passé en revue ces divergences ont également comparé ces réponses entre trois groupes d'enfants âgés de 6 à 12 ans : des enfants dyslexiques en difficulté pour lire des non-mots et des mots irréguliers, des enfants dysphasiques déficitaires dans la répétition de non-mots et de phrases et en vocabulaire et syntaxe sur le versant réceptif et des enfants contrôles, tous appariés en âge chronologique. Il a été observé que 38% des enfants avec TSL oral ou écrit présentent des réponses N1-P2 significativement moins « amples » sur l'électrode C3 tout aussi bien en réponse à des sons (rapides ou lents), des voyelles ou des signaux CV. Cette étude apporte ainsi des arguments contre d'une part un TTA spécifique aux sons brefs et rapides et d'autre part à un déficit parole-spécifique dans la dysphasie et/ou la dyslexie. De plus la totalité des 28 enfants à N1-P2 moins amples et dysphasiques et/ou dyslexiques sont également ceux dont les scores en lecture de non-mots sont les plus faibles alors que ceux dyslexiques et dysphasiques avec N1-P2 d'amplitude normale lisent correctement les non-mots. Cela suggère qu'un TTA pourrait être un facteur de risque de TSL. Ce serait une cause suffisante mais non nécessaire dans la mesure où un certain nombre d'enfants avec TSL lisent mal les non-mots mais ont des réponses N1-P2 normales. La mise en parallèle des anomalies électrophysiologiques avec celles morphologiques décrites (121) chez l'enfant dysphasique et dyslexique permet de formuler des hypothèses quant au fait que les enfants avec des réponses corticales anormales développent de faibles compétences en lecture et en répétition de non-mots. On peut en effet se demander si d'un côté, des structures cérébrales anormalement larges et asymétriques n'émettent pas moins de réponses typiques au son, entravant le développement des compétences phonologiques nécessaires pour lire les non-mots (dyslexie). Et d'un autre côté si des structures cérébrales anormalement petites et symétriques n'émettent pas moins de réponses cérébrales typiques détériorant le développement normal des compétences phonologiques indispensables pour lire et répéter les non-mots (dysphasie). Plus récemment, il a été confirmé l'existence, chez les enfants mauvais lecteurs, d'anomalies concernant la représentation asymétrique de l'enveloppe temporelle basse fréquence (représentation de la syllabe) de la parole : dominante dans l'hémisphère droit chez les normolecteurs, une moindre robustesse de cette latéralisation est observée chez les enfants mauvais lecteurs (122). Enfin, certaines études ont exploré les différences de transfert inter-hémisphérique de l'information en utilisant des stimulations dichotiques. L'hypothèse d'un transfert inter-hémisphérique altéré chez l'enfant avec un TSL est confirmée par l'existence d'une transmission neurale retardée en situation dichotique d'écoute que ce soit avec des stimuli de non parole (voir pour revue (123)) ou de parole (124). Des preuves objectives concernant le rôle de facteurs potentiellement responsables du déficit gauche ont été rapportées : des temps de conduction neurale ralentis, un faible transfert inter-hémisphérique de l'activité neurale et un échec pour supprimer l'information compétitive arrivant sur l'oreille droite.

Les études utilisant la magnétoencéphalographie révèlent des asymétries hémisphériques réduites dans la localisation de l'onde

auditive N260m avec un manque d'asymétrie du planum temporel (125) et une organisation différente du traitement auditif cortical chez l'enfant dyslexique (109 ; 126). Plus récemment, il a été observé, chez des enfants à faibles compétences en lecture soumis à un paradigme « oddball » avec des déviants comme /bat/, /kat/, /rat/ vs le standard /pat/, des activations retardées et réduites dans l'hémisphère gauche (gyrus temporal supérieur) en réponse à des couples de syllabes les moins contrastées phonologiquement (ex. bat-pat) (127). Du fait que les faibles lecteurs présentent des activations plus fortes que les bons lecteurs dans des conditions phonologiquement faciles (rat /pat), cela objective l'existence, chez les enfants avec difficultés pour lire, d'une carence (faiblesse) dans leurs aptitudes phonologiques.

Beaucoup d'études ont consisté à mesurer objectivement les capacités des enfants à discriminer, par exemple, la durée entre deux stimuli, la différence de FM, ou entre 2 syllabes de type CV, à détecter un gap ou faire des JOT... c'est-à-dire toutes les compétences auditives vues précédemment comme pouvant être déficitaires chez les enfants avec TSL. Pour une majorité d'entre elles, c'est l'onde de discordance (MMN=MisMatch Negativity) qui a été enregistrée. Si les études conduisent encore à des résultats inconstants (voir pour revue (128)) surtout chez le dyslexique (129), elles apportent dans leur ensemble des preuves en faveur de déficits pour traiter certains indices acoustiques pertinents pour la perception de la parole, comme par exemple les changements fréquents et temporels à l'intérieur des signaux de parole. Une étude récente conduite chez le nouveau-né soumis à un paradigme « oddball » (son standard 1 kHz ; son déviant 1100 Hz), des réponses corticales atypiques chez les enfants à risque de dyslexie et devenant dyslexiques sont observées (130). En particulier, alors que les enfants sans risque et lisant bien présentent des réponses plus amples sur l'hémisphère droit, les enfants à risque et dyslexiques présentent la configuration inverse. En revanche, les enfants à risque mais lisant bien ont les mêmes prépondérances hémisphériques que ceux sans risque et lisant bien mais leurs réponses corticales sont moins amples. Ainsi, il semble possible, en étudiant le traitement du changement de pitch à la naissance de disposer d'un indice concernant le facteur de risque au moins dans certains sous-types de dyslexie, i.e ceux avec un déficit général du traitement auditif.

Outre ces déficits corticaux, des anomalies sont décrites chez les enfants avec TSL au niveau de certaines réponses générées dans le tronc cérébral et elles concernent plus particulièrement les ondes sous-corticales recueillies en réponse aux sons de parole (voir pour revue (131)). Ainsi, 30 à 40% de ces enfants présentent des tracés dégradés avec des latences plus longues, des réponses transitoires dites « d'onset » (V, A, C et O), une pente moins marquée du complexe V/A, ainsi qu'une réduction de l'amplitude spectrale correspondant aux harmoniques du stimulus (cf. entre autres 132 ; 133 ; 134 ; 135 ; 136). En revanche, le traitement du pitch n'est pas altéré (136 ; 137). Ces réponses déficitaires contrastent avec la normalité des ondes obtenues en réponse à des clics ; elles témoigneraient d'anomalies spécifiques d'encodage des éléments spectro-temporels rapides de la parole comme par exemple un verrouillage de phase anormal dans le nerf auditif (134 ; 136). Les travaux effectués à la recherche de liens entre cet encodage sous-cortical déficitaire et les retards d'acquisition de la lecture, montrent non seulement que les enfants dyslexiques appartenant à un groupe à moindre difficulté en lecture sont ceux dont les ondes sous-corticales sont les plus précoces et les amplitudes harmoniques les plus élevées (132) mais aussi ceux chez qui ces réponses se différencient le mieux en fonction du contraste phonémique (/b/, /d/, /g/) présenté (138).



Cas particuliers : Effets du bruit, de la binauralité et des cadences de présentation des stimuli.

Comme nous l'avons déjà rapporté précédemment, les enfants avec TSL (oral et/ou écrit) présentent de faibles performances dans le bruit pouvant être expliquées par des mécanismes d'interaction binaurale défectueux. Ces déficits sont confirmés objectivement puisque, premièrement, ces enfants se caractérisent par des réponses corticales plus fortement dégradées en présence de bruit (134 ; 135 ; 139), surtout chez ceux dont l'encodage sous-cortical dans le silence est le plus déficitaire (140). Deuxièmement, leurs réponses générées au niveau du tronc cérébral sont également significativement plus amoindries par un masquage rétrograde comparées aux réponses mesurées chez l'enfant contrôle (141). Et enfin troisièmement, il a été trouvé, au moins dans des groupes d'enfants présentant un retard de langage oral, qualifiés par les auteurs d'enfants avec TTA, des amplitudes réduites de la composante d'interaction binaurale (142 ; 143). Toutefois, cette réduction n'est pas présente chez tous les enfants et ne corrèle pas avec la sévérité du déficit observée au niveau du langage (144). Elles corrélaient par contre avec les aptitudes d'écoute dans le bruit. Ainsi, de très récentes études ayant porté sur les réponses du tronc cérébral au son de parole chez des enfants dyslexiques montrent d'une part que l'encodage moins efficace de certaines caractéristiques du stimulus, en particulier celles importantes pour suivre la voix au cours du temps, et que d'autre part la faible résistance de la synchronisation de ces réponses face aux effets délétères du bruit sont en lien avec la perception dégradée de la parole dans le bruit (138 ; 145 ; 146). Outre ces divers déficits, il vient récemment d'être montré que les enfants avec TSA trouble du langage oral sont aussi plus particulièrement sensibles à la cadence de présentation des stimuli même de non parole. Ainsi l'augmentation de la cadence des clics retarde plus fortement l'apparition des ondes III et V chez ces enfants comparés à des enfants dont le langage se développe normalement, suggérant l'existence d'une plus forte susceptibilité à l'adaptation neurale (147).

Toutefois, la présence de ces déficits neurophysiologiques n'est pas systématiquement liée à des troubles auditifs perceptifs. Ainsi il a été rapporté que certains enfants dyslexiques à réponses sous-corticales déficientes réussissent parfaitement bien certaines épreuves comportementales d'audition centrale (écoute dichotique, tests de configuration en fréquence, parole filtrée passe-bas, phrases compétitives) (148). Cela montre l'importance de réaliser des bilans utilisant des méthodes les plus larges et diversifiées d'investigations de l'audition centrale tant les déficits du TTA présents chez ces enfants peuvent être variés.

3. Les voies auditives descendantes

Comme cela a été évoqué, la relation entre les processus perceptifs et neurophysiologiques peut être envisagée dans le cadre d'un réglage corticofuge (top-down) des structures auditives périphériques (149 ; 150). Dans ces conditions, les réponses du tronc cérébral en particulier celles à la parole, qui sont déterminées par l'acoustique du signal entrant, devraient pouvoir bénéficier d'amélioration corticofuge (151) via les fibres efférentes qui se projettent sur les noyaux auditifs sous-corticaux jusqu'aux cellules ciliées externes (CCE) situées dans la cochlée. Les études qui se sont intéressées à l'effet inhibiteur exercé par les fibres du système efférent olivo-cochléaire médian (SEOCM) sur les CCE, pour lequel nous disposons d'une méthode non invasive d'exploration chez l'humain (152 ; 153), révèlent des déficits de fonctionnement chez les enfants

avec TSL. Ainsi, une moindre fonctionnalité de ces fibres chez ceux présentant des difficultés d'apprentissage a été observée (154). D'autres études ont montré que ces dysfonctionnements sont plus particulièrement observés sur l'oreille droite chez des enfants muets sélectivement (103) ou chez des enfants dyslexiques (69). En ce qui concerne les enfants dysphasiques, si aucune anomalie de fonctionnement de ces fibres n'a été notée, il est rapporté cependant l'existence d'une corrélation significative entre les scores à un test de grammaire expressive et la fonctionnalité des fibres efférentes : les enfants les moins performants sont ceux qui présentent les SEOCM les moins fonctionnels sur l'oreille droite (155). Concernant les enfants diagnostiqués comme ayant un TTA, il sont plus enclins à présenter des SEOCM déficients (156 ; 157). Il est probable que cette modulation latéralisée de la cochlée puisse faciliter la perception de certaines composantes de la parole (69) plus particulièrement en présence de bruit (158 ; 159) en aidant l'auditeur à extraire l'information pertinente. Des déficits pourraient ainsi exister dans les interactions des processus top-down et bottom-up nécessaires pour surmonter les effets délétères des conditions difficiles d'écoute.

3

Le TTA en relation avec les diagnostics de TSA : relation causale et implications dans les interventions thérapeutiques ?

Toutes ces données montrent que les problèmes pour lire ou pour parler sont fréquents chez les enfants avec TTA mais tous ne sont pas atteints et tous les enfants avec TTA ne sont pas systématiquement dysphasiques et/ou dyslexiques. Rappelons qu'entre 0 à 50% des dyslexiques (soit en moyenne 39% d'entre eux) présentent des déficits auditifs avec une augmentation significative des problèmes de traitement auditif chez ce type d'enfants (voir pour revue générale 160). A cette co-morbidité s'ajoute très certainement des interactions néfastes dues au fait qu'un TTA peut être un facteur aggravant qui va contribuer à amplifier la diminution de certaines compétences phonologiques, comme par exemple celles dépendantes de la perception des transitions spectro-temporelles rapides ou celles nécessaires pour percevoir la parole dans le bruit. Selon Musiek et Coll. (2005) (161), il ne faut pas voir le TTA comme une cause directe des problèmes scolaires, d'apprentissage ou de lecture mais plus comme une composante, certes petite, mais importante pour l'écoute et l'apprentissage. Mais il doit être précisé que ce TTA, qui d'ailleurs ne se limite sans doute pas qu'à un déficit du traitement temporel rapide, ne paraît pas être strictement nécessaire et ni même suffisant pour qu'apparaisse un déficit d'apprentissage du langage puisque, surtout chez les enfants dyslexiques : 1) seulement un sous-groupe d'entre eux présentent des déficits auditifs robustes – 2) certains contrôles semblent présenter un traitement auditif anormal et pourtant n'ont pas développé de dyslexie – 3) les déficits dans le traitement auditif ne corrélaient que faiblement avec les compétences en lecture à l'intérieur du groupe de dyslexiques. Ainsi, un déficit phonologique peut très bien exister en l'absence de TTA et les performances auditives ne permettent pas toujours de prédire les performances phonologiques. Le TTA aggrave le TSL mais n'en est sans doute pas la cause directe. Toutefois, on peut supposer qu'ils leur imposent, mais seulement de manière éventuelle, une limite supérieure mais qu'il reste difficile à ce jour d'éteindre les multiples controverses au sujet du problème de fond en permanence posé : l'existence d'une relation causale entre des déficits qui co-apparaissent fréquemment.



Il sera important dans l'avenir de déterminer les facteurs responsables de cette co-morbidité. Dawes et Bishop (2010) (44) proposent plusieurs pistes à explorer : une étiologie commune (comme par exemple un développement neurologique), une prédisposition génétique, un déficit plus général comme des problèmes attentionnels ou mnésiques ou la maturation. Mais soulignons que même si nous disposons actuellement de mesures psychométriques (comportementales) ou neurophysiologiques (objectives) variées et relativement fiables du traitement auditif, lorsqu'elles sont déficitaires chez un enfant présentant un déficit d'acquisition du langage, il est toujours difficile d'en conclure que ce TTA est lié de manière causale à l'atteinte. Au-delà de la question de causalité, il y a celle concernant la prise en charge thérapeutique de ces enfants avec TSL et si dès 1996 il était rapporté une amélioration des habiletés verbales chez des enfants entraînés à des tâches de discrimination auditive (162), cette généralisation de l'effet de l'entraînement n'a pas toujours été retrouvée (voir pour revue récente (163)).

4

Conclusion

Finalement le TTA s'avère être une catégorie (certains disent une entité) problématique à diagnostiquer probablement parce qu'il se situe au croisement de différentes disciplines. En effet, un enfant avec TTA présente conjointement des difficultés auditives et d'apprentissage dans lequel le langage oral et la lecture se trouvent souvent impliqués. Encore trop souvent actuellement, et c'est encore plus particulièrement vrai en France où les pratiques cliniques diffèrent de celles des pays anglo-saxons (Etats-Unis, Australie ou Royaume Uni), peu de professionnels de la santé côtoyant des enfants avec troubles d'apprentissage se posent la question de la présence d'un TTA. Il existe beaucoup de confusions, non seulement entre professionnels de la santé s'occupant de ces enfants, mais aussi vis-à-vis des parents qui ne comprennent pas toujours l'intérêt du bilan d'audition alors que leur enfant n'a jamais eu de problèmes auditifs particuliers et surtout n'a pas de surdité. L'écueil à éviter est celui d'utiliser des labels différents pour les mêmes symptômes. Pour cela, la meilleure approche est de considérer les difficultés perceptives auditives comme intégrées dans une description multifactorielle des problèmes d'apprentissage et non pas comme une catégorie diagnostique propre. Cela évitera des erreurs bien dommageables : celles de cibler l'attention sur un seul aspect de ces difficultés alors qu'il est probablement beaucoup plus approprié de voir chaque cas comme impliquant des contributions venant de multiples domaines. Ce n'est qu'au moyen d'évaluations multi et interdisciplinaires que nous parviendrons à mettre en place des prises en charge thérapeutiques potentiellement les plus adaptées au déficit présenté par l'enfant et ainsi, nous l'espérons, plus efficaces.

5

Bibliographie

- Chermak GD, Musiek FE (1997). *Central Auditory Processing Disorder : New Perspectives*. San Diego: Singular Publishing Group, Inc.
- Bamiou DE, Musiek FE, Luxon LM (2001) Aetiology and clinical presentations of auditory processing disorders – a review. *Arch Dis Child* 85:361-365.
- Myklebust H (1954). *Auditory disorders in children*. New York : Grune & Stratton.
- Jerger J (1998) Controversial issue in CAPD. *Seminars in Hearing* 19: 395-400.
- Jerger J, Musiek F (2000) Report of the consensus conference on the diagnosis of auditory processing disorders in school-aged children. *J Am Acad Audiol* 11:467-474.
- Smoski WJ, Brunt MA, Tannahill JC. (1992) Listening characteristics of children with central auditory processing disorders. *Lang Speech Hear Serv Sch* 23: 145-149.
- Kirk SA, Kirk WD (1983) On defining learning disabilities. *J Learn Disabil* 16:20-21.
- American Speech-Language-Hearing Association Working Group on Auditory Processing Disorders (2005) Central auditory processing [technical report] Available from www.asha.org/policy.
- Cacace AT, McFarland DJ (1998) Central auditory processing disorder in school-aged children: A critical review. *J Speech Lang Hear Res*, 41: 355-373.
- King, W.M., Lombardino, L.J., Crandell, C.C., Leonard, C.M. (2003) Comorbid auditory processing disorder in developmental dyslexia. *Ear Hear* 24:448-456.
- Sharma A, Purdy SC, Newall P, Wheldall K, Beaman R, Dillon H (2006) Electrophysiological and behavioral evidence of auditory processing deficits in children with reading disorder. *Clin Neurophysiol* 17:1130-1144.
- Sharma M, Purdy S., Kelly AS (2009). Co-morbidity of auditory processing, language, and reading disorders. *J Speech Lang Hear Res*, 52 : 706-722.
- Iliadou V, Bamiou DE, Kaprinis S, Kandyli D, Kaprinis G (2009) Auditory processing disorders in children suspected of learning disabilities – A need for screening ? *Int J Ped Otorhinolaryngol* 2009, 73: 1029-1034
- Dawes P, Bishop DVM (2010) Psychometric profile of children with auditory processing disorder and children with dyslexia. *Arch Dis Child* 95:432-436.
- Ferguson, MA, Hall RL, Riley A, Moore DR (2010). Communication, listening, cognitive and speech perception skills in children with auditory processing disorder (APD) or specific language impairment (SLI). *J Speech Lang Hear Res* in press.
- Watson CS, Kidd GR (2009) Associations between auditory abilities, reading, and other language skills, in children and adults. In AT Cacace and DJ McFarland (Eds), *Controversies in central auditory processing disorder* (pp.217-242. Plural Publishing Inc.
- Tallal P, Piercy M (1973) Defects of nonverbal auditory perception in children with developmental aphasia. *Nature*, 241: 468-469.
- Tallal, P (1980) Auditory temporal perception, phonics, and reading disabilities in children. *Brain Lang* 92:182-198.
- Reed MA (1989) Speech perception and the discrimination of brief auditory cues in reading disabled children. *J Exp Child Psychol* 48: 270-292.
- Tallal P, Merzenich MM, Miller S, Jenkins W (1998) Language learning impairments: integrating basic science, technology and remediation. *Exp Brain Res* 123: 210-219.
- Farmer ME, Klein R (1995) The evidence for a temporal processing deficit linked to dyslexia: A review. *Psychosom Bull Rev* 2:460-493.
- Habib M (2000) The neurological basis of developmental dyslexia : an overview and working hypothesis. *Brain* 123:2373-2399.
- Cohen-Mimran R, Sapir S (2007) Auditory temporal processing deficits in children with reading disabilities. *Dyslexia* 13: 175-192
- Tallal, P (2004) Improving language and literacy is a matter of time. *Nat Rev Neurosci* 5:721-728.
- Snowling M (2001) From language to reading and dyslexia. *Dyslexia* 7:37-46.
- Nittrouer S (1999) Do temporal processing deficits cause phonological processing problems? *J Speech, Lang Hear Res* 42:925-942.
- Rosen S, Adlard A, van der Lely HKJ (2009) Backward and simultaneous masking in children with grammatical specific language impairment: No simple link between auditory and language abilities. *J Speech Lang Hear Res* 52:396-410.
- Bishop DVM, Carlyon RP, Deeks JM, Bishop SJ (1999) Auditory temporal processing impairment: neither necessary nor sufficient for causing language impairment in children. *J. Speech Lang Hear Res* 42:1295-1310.



29. Wright BA, Lombardino LJ, King WM, Puranik CS, Leonard CM, Merzenich MM (1997) Deficits in auditory temporal and spectral resolution in language-impaired children. *Nature* 387:176-178.
30. Montgomery CR, Morris RD, Sevcik RA, Clarkson MG (2005) Auditory backward masking deficits in children with reading disabilities. *Brain Lang* 95:450-456
31. Talcott JB, Witton C, McLean MF, Hansen PC, Rees A, Green GGR, Stein JF (2000) Dynamic sensory sensitivity and children's word decoding skills. *Proc Natl Acad Sci USA* 97:2952-2957
32. Halliday LF, Bishop DVM (2006) Auditory frequency discrimination in children with dyslexia. *J Res Reading* 29:213-228.
33. Hill PR, Hogben J, Bishop DVM (2005) Auditory frequency discrimination in children with specific language impairment: A longitudinal study. *J Speech Lang Hear Res* 48: 1136-1146.
34. McArthur GM, Bishop DVM (2004) Frequency discrimination deficits in people with specific language impairment: reliability, validity, and linguistic correlates. *J Speech Lang Hear Res* 47: 527-541.
35. McArthur GM, Bishop DVM (2005) Speech and non-speech processing in people with specific language impairment: A behavioural and electrophysiological study. *Brain Lang* 94: 260-273.
36. Dougherty RF, Cynader MS, Bjornson BH, Edgell D, Giaschi DE (1998) Dichotic pitch: a new stimulus distinguishes normal and dyslexic auditory function. *Neuroreport* 9: 3001-3005
37. Bishop DVM, Adams CV, Nation K, Rosen S (2005) Perception of transient nonspeech stimuli is normal in specific language impairment: evidence from glide discrimination. *Appl Psycholing* 26: 175-194
38. Mengler ED, Hogben JH, Michie P, Bishop DVM (2005) Poor frequency discrimination is related to oral language disorder in children: a psychoacoustic study. *Dyslexia* 11: 155-173
39. Van Ingelghem M, van Wieringen A, Vandenbussche E, Onghena P, Gesquiere P (2001) Psychophysical evidence for a general temporal processing deficit in children with dyslexia. *Neuroreport* 12:3603-3607.
40. Hautus MJ, Setchell G, Waldie KE, Kirk I (2003) Age-related improvements in auditory temporal resolution in reading-impaired children. *Dyslexia* 9:37-45
41. Fishner B, Hartnegg K (2004) On the development of low-level auditory discrimination and deficits in dyslexia. *Dyslexia* 10:105-118.
42. Goswami U, Thomson J, Richardson U, Stainthorpe R, Hughes D, Rosen S, Scott SK (2002) Amplitude envelope onsets and developmental dyslexia: A new hypothesis. *Proc Natl Acad Sci USA* 99: 10911-10916.
43. Richardson U, Thomson JM, Scott S, Goswami U (2004) Auditory processing skills and phonological representation in dyslexic children. *Dyslexia* 10:215-233.
44. Halliday LF, Bishop DVM (2006). Is poor frequency modulation detection linked to literacy problems? A comparison of specific reading disability and mild to moderate sensorineural hearing loss. *Brain & Lang* 97: 200-213.
45. Georgiou GK, Protopapas A, Papadopoulos TC, Skaloubakas C, Parrila R (2010) Auditory temporal processing and dyslexia in an orthographically consistent language. *Cortex*, in press.
46. Talcott JB, Witton C, McLean MF, Hansen PC, Rees A, Green G et Coll (1999) Can sensitivity to auditory frequency modulation predict children's phonological and reading skills? *Neuroreport* 10:2045-2050.
47. Talcott JB, Witton C, Hebb GS, Stoodley CJ, Westwood EA, France SJ, Hansen PC, Stein JF (2002) On the relationship between dynamic visual and auditory processing and literacy skills: results from a large primary-school study. *Dyslexia* 8: 204-225.
48. White S, Milne E, Rosen S, Hansen P, Swettenham J, Frith U, Ramus F (2006) The role of sensorimotor impairments in dyslexia: a multiple case study of dyslexic children. *Dev Sci* 9:237-269.
49. Boets B, Wouters J, van Wieringen A, Ghesquiere P (2006) Auditory temporal information processing in preschool children at family risk for dyslexia: Relations with phonological abilities and developing literacy skills. *Brain Lang* 97: 64-79.
50. Rosen S (1999). Language disorders: a problem with auditory processing? *Cur Biol* 9:R698-R700.
51. Rosen S (2003) Auditory processing in dyslexia and specific language impairment: is there a deficit? What is its nature? Does it explain anything? *J Phonetics*, 31:509-527
52. Ramus F, Rosen S, Dakin SC, Day BL, Castellote JM, White S, Frith U (2002) Theories of developmental dyslexia : insights from a multiple case study of dyslexic adults. *Brain* 126:841-865.
53. Boets B, Wouters J, van Wieringen A, Ghesquiere P (2007) Auditory processing, speech perception and phonological ability in preschool children at risk for dyslexia: A longitudinal study of the auditory temporal processing theory. *Neuropsychologia* 45:1608-1620.
54. Lallier M, Thierry G, Tainturier MJ, Donnadieu S, Peyrin C, Billard C, Valdois S. (2009) Auditory and visual stream segregation in children and adults : An assessment of the modality assumption of the « sluggish attentional shifting » theory of dyslexia. *Brain Res* 1302:132-147.
55. Hari R, Valtia M, Uutela K (1999) Prolonged attentional dwell time in dyslexic adults. *Neurosci Lett*, 271: 202-204.
56. Ahissar M (2007) Dyslexia and the anchoring-deficit theory. *Trends Cogn Sci* 11:458-465.
57. Moore DR, Ferguson MA, Edmondson-Jones M, Tatib S, Riley A (2010) Nature of auditory processing disorder in children. *Pediatrics* 126: e382-e390.
58. Snowling, M.J. (2000) *Dyslexia*, 2e ed. Oxford : Blackwell.
59. Greenberg S (2006) A multi-tier theoretical framework for understanding spoken language. In S. Greenberg & W.A. Ainsworth (Eds.), *Listening to Speech: An Auditory perspective* (pp.411-433). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
60. Tallal P, Piercy M (1974) Developmental aphasia: rate of auditory processing and selective impairment of consonant perception. *Neuropsychologia* 12:83-93.
61. Tallal P, Piercy M (1975) Developmental aphasia: the perception of brief vowels and extended stop consonants. *Neuropsychologia* 13:69-74.
62. Rey V, de Martino S, Espesser R, Habib M (2002) Temporal processing and phonological impairment in dyslexia: effect of phoneme lengthening on order judgment of two consonants. *Brain Lang* 80: 576-591
63. Schulte-Körne G, Deimel W, Bartling J, Remschmidt H (1998) Auditory processing and dyslexia: evidence for a specific speech processing deficit. *Neuroreport* 9:337-340.
64. Liberman AM, Harris KS, Hoffman HS, Griffith BC (1957) The discrimination of speech sounds within and across phoneme boundaries. *J Exp Psychol* 54:358-368.
65. Blomert L, Mitterer H (2004) The fragile nature of the speech-perception deficit in dyslexia: Natural vs. synthetic speech. *Brain Lang* 89:21-26.
66. Chiappe P, Chiappe DL, Siegel LS (2001) Speech perception, lexicality, and reading skills. *J Exp Child Psychol* 80:58-74.
67. Mody M, Studdert-Kennedy M, Brady S (1997) Speech perception deficits in poor readers: auditory processing or phonological coding? *J. Exp. Child Psychol* 64:199-231.
68. Werker JF, Tees RC (1987) Speech perception in severely disordered and average reading children. *Can J Psychol* 41:48-61.
69. Veuillet E, Magnan A, Ecalle J, Thai-Van H, Collet L (2007) Auditory processing disorder in children with reading disabilities: Effect of an audiovisual training. *Brain*, 130:2915-2928.
70. Breier JI, Fletcher JM, Denton C, Gray LC (2004) Categorical perception of speech stimuli in children at risk for reading difficulty. *J Exp Child Psychol* 88:152-170.
71. Godfrey JJ, Syndal-Larsky AK, Millay KK, Knox CM (1981) Performance of dyslexic children on speech perception tests. *J Exp Child Psychol* 32:401-424.
72. Serniclaes W, Sprenger-Charolles L, Carre R, Demonet JF (2001) Perceptual discrimination of speech sounds in developmental dyslexia. *J Speech Lang Hear Res* 44:384-399.
73. Boada R., Pennington, B.F. (2006). Deficient implicit phonological representation in children with dyslexia. *J Exp Child Psychol* 95: 153-193.
74. Ramus F, Szenkovitz G (2008) What phonological deficit? *Q J Exp Psychol (Colchester)* 61: 129-141.
75. Shaywitz, S.E., Shaywitz, B.A. (2005). Dyslexia (specific reading disability). *Biol. Psychiatry*, 57:1301-1309.
76. Vellutino FR, Fletcher JM, Snowling MJ, Scanlon DM (2004) Specific reading disability (dyslexia): what have we learned in the past four decades. *J Child Psychol Psychiatr* 45:2-40.



77. Robertson EK, Joanisse MF, Desroches AS, Ng S. (2009) Categorical speech perception deficits distinguish language and reading impairments in children. *Dev Sci* 12:753-767.
78. Jamieson DG, Kranjc G, Yu K, Hodgetts WE (2004) Speech intelligibility of young school-aged children in the presence of real-life classroom noise. *J Am Acad Audiol* 15: 508-517.
79. Bradley JS, Sato, H (2008) The intelligibility of speech in elementary school classrooms. *J Acoust Soc Am*, 123:2078-2096.
80. Bradlow AR, Kraus N, Hayes E. (2003) Speaking clearly for children with learning disabilities: Sentence perception in noise. *J Speech Lang Hear Res* 46:80-97.
81. Sperling AJ, Lu ZL, Manis FR, Seidenberg MS (2005) Deficits in perceptual noise exclusion in developmental dyslexia. *Nat Neurosci* 8:862-863.
82. Ziegler JC, Pech-Georgel C, George F, Alario FX, Lorenzi C (2005) Deficits in speech perception predict language learning impairment. *Proc Natl Acad Sci USA* 102:14110-14115.
83. Ziegler JC, Pech-Georgel C, George F, Lorenzi C (2009) Speech-perception in noise in dyslexia. *Dev Sci* 12:732-745.
84. Wightman FL, Kistler DJ (2005) Informational masking of speech in children: Effects of ipsilateral and contralateral distracters. *J Acoust Soc Am* 118:3164-3176.
85. Nitttrouer S (2002) From ear to cortex: A perspective on what clinicians need to understand about speech perception and language processing. *Lang Speech Hear Serv Sch* 33:237-252.
86. Lewis D, Hoover B, Choi S, Stelmachowicz P (2010) Relationship between speech perception in noise and phonological awareness skills in normal hearing. *Ear Hear* in press.
87. McAnally KI, Stein JF (1996). Auditory temporal coding in dyslexia. *Proc R Soc Lond B Biol Sci*, 263: 961-965.
88. Stollman MHP, van Velzen ECW, Simkens HMF, Snik AFM, van den Broek P (2003) Assessment of auditory processing in 6-year-old language impaired children. *Int J Audiol* 42:303-311.
89. Rouch J, Tait CA (1984) Binaural fusion, masking level differences, and auditory brainstem brain-stem responses in children with language-learning disabilities. *Ear Hear* 5:37-41.
90. Bryden MP (1988) An overview of the dichotic listening procedure and its relation to cerebral organization. In K Hugdahl (Ed), *Handbook of dichotic listening: Theory, methods and research* (pp.1-43). Chichester, England: Wiley.
91. Hugdahl K, Helland T, Faerevaag MK, Lyssand ET, Asbjornsen A (1995) Absence of ear advantage on the consonant-vowel dichotic listening test in adolescent and adult dyslexics: Specific auditory-phonemic dysfunction. *J Clin Exp Neuropsychol* 17: 833-840.
92. Jerger J, Martin J (2006) Dichotic listening tests in the assesment of auditory processing disorders. *Audiol Med* 4:25-34.
93. Hiscock M, Kinsbourne M (1982) Laterality and dyslexia: A critical view. *Annals of Dyslexia* 32:177-228.
94. Hiscock M, Kinsbourne M (1995) Progress in the measurement of laterality and implications for dyslexia research. *Ann Dyslexia* 45: 249-268.
95. Asbjornsen AE, Helland T, Obrzut JE, Boliek CA (2003). The role of dichotic listening performance and tasks of executive functions in reading impairment: A discriminant function analysis. *Child Neuropsychol* 9:277-288.
96. Moncrieff DH, Black JR (2008) Dichotic listening deficits in children with dyslexia. *Dyslexia* 14: 54-75.
97. Demanez L, Dony-Glosion B, Lhonneux-Ledoux F, Demanez JP (2003) Central auditory processing assessment: a French speaking battery. *Acta Oto-Rhino-Laryngol Belgica*, 57: 275-290.
98. Moncrieff D, Musiek F (2002) Interaural asymmetries revealed by dichotic listening tests in normal and dyslexic children. *J Am Acad Audiol*. 13:428-437.
99. Bellis TJ, Ferre JM (1999) Multidimensional approach to the differential diagnosis of central auditory processing disorders in children. *J. Am. Acad. Audiol*. 10:319-328.
100. Kimura D (1967) Functional asymmetry of the brain in dichotic listening. *Cortex* 3: 163-168.
101. Hugdahl K. Dichotic listening: probing temporal lobe functional integrity (1995) In *Brain and Asymmetry*, ed. RJ Davidson and K Hugdahl. MIT Press, Cambridge, MA, pp.123-156.
102. Kinsbourne M (1970) The cerebral basis of lateral asymmetries in attention. *Acta Psychologica (Amst)* 33:193-201.
103. Helland T, Asbjornsen AE, Hushovd AE, Hugdahl K (2008) Dichotic listening and school performance in dyslexia. *Dyslexia* 14:42-53
104. Leonard CM, Eckert M (2008) Asymmetry and Dyslexia. *Dev. Neuropsychol*. 33(6): 663-681.
105. Chiarello C, Lombardino LJ, Kacinik NA, Otto R, Leonard CM (2006) Neuroanatomical and behavioral asymmetry in an adult compensated dyslexic. *Brain Lang* 98:169-181.
106. Welcome SE, Leonard CM, Chiarello C (2010) Alternate reading strategies and variable asymmetry of the planum temporale in adult resilient readers. *Brain Lang* 113:73-83.
107. Kibby MY, Pavawalla SP, Fancher JB, Naillon MS, Hynd ED (2009) The relationship between cerebral hemisphere volume and receptive language functioning in dyslexia and attention-deficit/hyperactivity disorder. *J Child Neurol*. 24: 438-448.
108. Galaburda AM (1999) Developmental dyslexia: A multilevel syndrome. *Dyslexia*, 5: 183-191.
109. Heim S, Keil A (2004) Large-scale neural correlates of developmental dyslexia. *Eur. Child & Adolescent Psychiatry*, 13: 125-140
110. Dibbets P, Bakker K, Jolles J (2006) Functional MRI of task switching in children with specific language impairment (SLI). *Neurocase* 12:71-79.
111. Gaab N, Gabrieli JDE, Deutsch GK, Tallal P, Temple E (2007) Neural correlates of rapid auditory processing are disrupted in children with developmental dyslexia and ameliorated with training: An fMRI study. *Restorative Neurology and Neuroscience*, 2007, 25: 295-310.
112. Heim S, Grande M, Meffert E, Eickhoff SB, Schreiber H, Kukulja J, Shah NJ, Huber W, Amunts K (2010a) Cognitive levels of performance account for hemispheric lateralisation effects in dyslexic and normally reading children. *NeuroImage* 13: 1348-1356.
113. Heim S, Grande M, Pape-Neumann J, van Ermingen M, Meffert E, Grabowska A, Huber W, Amunts K (2010b) Interaction of phonological awareness and "magnocellular" processing during normal and dyslexic reading: Behavioural and fMRI investigations. *Dyslexia* 16:258-282.
114. Richlan F, Kronbichler M, Wimmer H (2009) Functional abnormalities in the dyslexic brain: A quantitative meta-analysis of neuroimaging studies. *Human Brain Mapping* 30:3299-3308.
115. MacSweeney M, Brammer MJ, Waters D, Goswami U (2009) Enhanced activation of the left inferior frontal gyrus in deaf and dyslexic adults during rhyming. *Brain* 132: 1928-1940.
116. Temple E (2002) Brain mechanisms in normal and dyslexic children. *Curr Opin Neurobiol* 12:178-193.
117. Hoeft F, Meyler A, Hernandez A, Juel C, Taylor-Hill H, Martindale JL, McMillon G, Kolchugina G, Black JM, Faizi A, Deutsch GK, Siok WT, Reiss AL, Whitfield-Gabrieli S, Gabrieli JDE (2007) Functional and morphometric brain dissociation between dyslexia and reading disability. *Proc Natl Acad Sci USA* 104:4234-4239.
118. Blau V, Reithler J, van Atteveldt N, Seitz J, Gerretsen P (2010) Deviant processing of letters and speech sounds as proximate cause of reading failure: a functional magnetic resonance imaging study of dyslexic children. *Brain* in press.
119. Hairston WD, Burdette JH, Flowers DL, Wood FB, Wallace MT (2005) Altered temporal profile of visual-auditory multisensory interactions in dyslexia. *Exp. Brain Res* 166:474-480
120. McArthur G, Atkinson C, Ellis D (2009) Atypical brain responses to sounds in children with specific language and reading impairments. *Dev Sci*, 2009, 12: 768-783.
121. Leonard CM, Eckert M, Given B, Viriginia B, Eden G (2006) Individual differences in anatomy predict reading and oral language impairments in children. *Brain* 129: 3329-3342.
122. Abrams DA, Nicol T, Zecker S, Kraus N (2009) Abnormal cortical processing of the syllable rate of speech in poor readers. *J Neurosci* 2009, 17:7686-7693.
123. Leppänen PHT, Lyytinen H (1997) Auditory event-related potentials in the study of developmental language-related disorders. *Audiol Neurotol* 2: 308-340.
124. Jerger J, Thibodeau L, Martin J, Mehta J, Tillman G, Greenwald R, Britt L, Scott J, Overson G (2002) Behavioral and electrophysiological



- gical evidence of auditory processing disorder: a twin study. *J Am Acad Audiol* 13: 438-460.
125. Foster LM, Hynd GW, Morgan AE, Hugdahl L (2002) Planum temporale asymmetry and ear advantage in dichotic listening in developmental dyslexia and attentional deficit/hyperactivity disorder (ADHD). *J Int Neuropsychol Soc* 8:22-36.
126. Paul I, Bott C, Heim S, Eulitz C, Elbert T (2006) Reduced hemispheric asymmetry of the auditory N260m in dyslexia. *Neuropsychologia*, 44:785-794.
127. Wehner DT, Ahifors SP, Mody M (2007) Effect of phonological contrast on auditory word discrimination in children with and without reading disability: A magnetoencephalography (MEG) study. *Neuropsychologia* 45:3251-3262.
128. Bishop, DVM (2007) Using mismatch negativity to study central auditory processing disorder in developmental language and literacy impairments: Where are we, and where should be going? *Psychol Bull* 133:651-672.
129. Schulte-Körne G, Bruder J (2010) Clinical neurophysiology of visual and auditory processing in dyslexia: A review. *Clin Neurophysiol in press*
130. Leppänen PHT, Hämäläinen JA, Salminen HK, Eklund KM, Guttorm TK, Lohvansuu K, Puolakanaho A, Lyytinen H (2010) Newborn brain event-related potentials revealing atypical processing of sound frequency and the subsequent association with later literacy skills in children with familial dyslexia. *Cortex in press*.
131. Banai K, Abrams D, Kraus N (2007) Sensory-based learning disability: Insights from brainstem processing of speech sounds. *Int J Audiol*, 46:524-532.
132. Banai K, Hornickel J, Skoe E, Nicol T, Zecker S, Kraus N (2009) Reading and subcortical auditory function. *Cereb Cortex* 19:2699-2707.
133. Banai K, Nicol T, Zecker SG, Kraus N (2005) Brainstem timing implications for cortical processing and literacy. *J Neurosci* 25:9850-9857.
134. Cunningham J, Nicol T, Zecker SG, Bradlow A, Kraus N (2001) Neurobiologic responses to speech in noise in children with learning problems: deficits and strategies for improvement. *Clin Neurophysiol* 112:758-767.
135. King C, Warrier CM, Hayes E, Kraus N (2002) Deficits in auditory brainstem pathway encoding of speech sounds in children with learning problems. *Neurosci Lett* 319: 111-115
136. Wibble B, Nicol T, Kraus N (2004) Atypical brainstem representation of onset formant structure of speech sounds in children with language-based learning problems. *Biol Psychol* 67:299-317
137. Johnson KL, Nicol TG, Zecker SG, Kraus N (2007) Auditory brainstem correlates of perceptual timing deficits. *J Cog Neurosci* 19: 376-385.
138. Hornickel J, Skoe E, Nicol T, Zecker S, Kraus N (2009) Subcortical differentiation of stop consonants relates to reading and speech-in-noise perception. *Proc Natl Acad Sci USA* 106:13022-13027.
139. Wibble B, Nicol T, Kraus N (2002) Abnormal neural encoding of repeated speech stimuli in noise in children with learning problems. *Clin Neurophysiol* 113:485-494
140. Wible B, Nicol T, Kraus N (2005) Correlation between brainstem and cortical auditory processes in normal and language-impaired. *Brain* 128:417-423.
141. Marler JA, Champlin CA, Gillam RB (2002) Auditory memory for backward masking signals in children with language impairment. *Psychophysiology* 39:767-780.
142. Gopal KV, Pierel K (1999) Binaural interaction component in children at risk for central auditory processing disorders. *Scand Audiol* 28:77-84
143. Delb W, Strauss DJ, Holenberg G, Plinkert PK (2003) The binaural interaction component (BIC) in children with central auditory processing disorders (CAPDs). *Int J Audiol* 42:401-412.
144. Clarke EM, Adams C (2007) Binaural interaction in specific language impairment: an auditory evoked potential study. *Dev Med Child Neurol* 49:274-279.
145. Chandrasekaran B, Hornickel J, Skoe E, Nicol T, Kraus N (2009) Context-dependent encoding in the human auditory brainstem relates to hearing speech in noise: Implications for developmental dyslexia. *Neuron* 64:311-319.
146. Anderson S, Skoe E, Chandrasekaran B, Kraus N (2001) Neural timing is linked to speech perception in noise. *J Neurosci* 30:4922-4926.
147. Basu M, Krishnan, A, Weber-Fox C (2010) Brainstem correlates of temporal auditory processing in children with specific language impairment. *Dev Sci* 13: 77-91.
148. Billiet CR, Bellis TJ (2010) The relationship between brainstem temporal processing and performance on tests of central auditory function in children with reading disorders. *J Speech Language Hear Res in press*.
149. Zhang YF, Suga N (2005) Corticofugal feedback for collicular plasticity evoked by electric stimulation of the inferior Colliculus. *J Neurophysiol* 94:2676-2682.
150. Zhang YF, Suga N (2000) Modulation of responses and frequency tuning of thalamic and collicular neurons by cortical activation in mustached bats. *J Neurophysiol* 84:325-333.
151. Gao E, Suga N (2000) Experience-dependent plasticity in the auditory cortex and the inferior colliculus of bats: Role of the corticofugal system. *Proc Natl Acad Sci USA* 97:8081-8086.
152. Collet L, Kemp DT, Veuillet E, Duclaux R, Moulin A, Morgon A (1990) Effect of contralateral auditory stimuli on active cochlear micro-mechanical properties in humans subjects. *Hear Res* 43:251-262.
153. Veuillet E, Collet L, Duclaux R (1991) Effect of contralateral acoustic stimulation on active cochlear micromechanical properties in human subjects: dependence on stimulus variables. *J Neurophysiol* 65:724-735.
154. Veuillet E, Bazin F, Collet L (1999) Objective evidence of peripheral auditory disorders in learning-impaired children. *J Audiol Med* 8:18-29.
155. Bar-Haim Y, Ari-Even-Roth D, Tetin-Schneider S, Hildesheimer M, Muchnik C (2004) Reduced auditory efferent activity in childhood selective mutism. *Biol Psychiatry* 55:1061-1068.
155. Clarke EM, Ahmed A, Parker D, Adams C (2006) Contralateral suppression of otoacoustic emissions in children with specific language impairment. *Ear Hear* 27:153-160.
156. Sanchez SCG, Carvallo RM (2006) Contralateral suppression of transient evoked otoacoustic emissions in children with auditory processing disorders. *Audiol Neurotol* 11:366-372.
157. Muchnik C, Ari-Even Roth D, Ohtman-Jebara R, Petter-Katz H, Shabtai EL, Hildesheimer M (2004) Reduced medial olivocochlear bundle system function in children with auditory processing disorders. *Audiol Neurotol* 9:107-114.
158. de Boer J, Thornton AR (2008) Neural correlates of perceptual learning in the auditory brainstem: efferent activity predicts and reflects improvement at a speech-in-noise discrimination task. *J Neurosci* 28:4929-4937.
159. Luo F, Wang Q, Kashani A, Yan J (2008) Corticofugal modulation of initial sound processing in the brain. *J Neurosci* 28:11615-11621.
160. Tallal P (2003) Language learning disabilities: integrating research approaches. *Cur Dir Psychol Sci* 12:206-211.
161. Musiek F, Bellis T, Chermak G (2005) Non-modularity of the central auditory nervous system: Implications for (central) auditory processing disorder. *Am J Audiol* 14: 128-138.
162. Tallal P, Miller S, Bedi G, Byma G, Wang X, Nagarajan S, Schreiner C, Jenkins WM, Mezernich MM (1996) Language comprehension in language-learning impaired children improved with acoustically modified speech. *Science* 271:81-84.
163. Loo JHY, Bamiou DE, Campbell N, Luxon LM (2010). Computer-based auditory training (CBAT) : benefits for children with language-and reading-related learning difficulties. *Dev Med Child Neurol*, 58: 708-717.