

Maturation des processus auditifs centraux

Naïma Deggouj, Service ORL et Chirurgie Cervico-faciale, Clinique Universitaire Saint Luc, Av. Hippocrate, 10 - B, 1200 Bruxelles

Laurent Demanez, Service ORL et Chirurgie Cervico-faciale, CHU Liège, Boulevard de l'hôpital, 1 - B, 4000 Liège

1 Définition

Les processus auditifs centraux concernent tous les traitements réalisables par les voies auditives centrales et permettent la détection, la discrimination et l'intelligibilité correcte des stimulations acoustiques. Cela va de la perception correcte des fréquences, des intensités, des durées, à la détection correcte des variations de ces différents paramètres. Les troubles auditifs centraux se révéleront particulièrement dans les conditions où les stimuli sont très dégradés (sons dégradés, articulation floue ou débit de parole très rapide, parole produite par un locuteur étranger ou dans une langue étrangère mal connue) ou dans des conditions d'écoute non favorables (interférence avec du bruit, des voix concurrentes). Ils permettent également la localisation correcte des sources sonores.

L'intérêt porté aux sujets présentant des troubles des processus auditifs centraux renaît ces derniers temps. Dans la littérature anglo-saxonne, on parle de APD (auditory processing disorders) ou de CAPD (central auditory processing disorders)¹. Il s'agit de sujets se comportant comme des malentendants, dans certaines conditions alors que leurs audiométries tonales voire vocales, en cabine insonorisée, sont normales.

Puisque les désordres des processus auditifs centraux touchent en particulier le traitement de la parole, il est utile de rappeler les modèles récents de la perception de la parole avant d'aborder leur maturation.

2 Modèles de perception de la parole : les voies dorsales et ventrales

Les modèles récents de perception de la parole s'inspirent de ceux élaborés pour la vision où il est décrit une voie ventrale, qui permet de percevoir l'objet ou le visage (« what »), et une voie dorsale qui permet d'analyser les caractéristiques, comme par exemple celles spatiales de l'objet ou du visage (« where » ou « how »)². Lorsque la voie dorsale est touchée, le sujet ne peut plus reconnaître les visages alors qu'il peut donner les caractéristiques du visage, décrire les mouvements qu'il fait, pratiquer la lecture labiale, etc. En ce qui concerne la perception de la parole, Zaehle a décrit en 2008 un modèle séduisant qui complète les modèles de Hickok-Poeppel (2004-2007) et Scott-Wise (2004)³.

Les sons changeant rapidement en fréquence et en durée (parole ou non) provoquent tout d'abord une

stimulation du cortex auditif primaire (gyrus de Heschl) et de l'aire associative proche (planum temporal) bilatérale mais plus marquée à gauche. Les sons à contenu phonologique stimulent également une autre zone : la partie médiane des sulcus et gyrus temporaux supérieurs également de manière bilatérale mais avec une prédominance gauche. A partir de cette région, comme pour la vision, deux voies vont intervenir : une voie ventrale et une dorsale.

La voie ventrale fait intervenir la partie plus antérieure du gyrus temporal supérieur. Elle donnerait accès à l'information lexicale = voie du « what »². Les tests cliniques se basant sur la compréhension de mots utilisent cette voie. Cette région est également activée lorsque le contenu spectral d'une stimulation complexe est l'objet d'une variation, que ce soit de la parole ou non.

La voie dorsale ou phonologique ou du « how » utilise des circuits neuronaux distribués en région temporale (postérieure), pariétale et frontale. Elle analyse la façon dont les sons sont produits et agencés. Ce réseau est activé également par des changements du contenu temporel de stimulations complexes, qu'elles soient de parole (VOT = voice onset time - temps de voisement) ou non. Il détecte des variations rapides de stimuli, comme les stimuli phonologiques. Les tests cliniques utilisant ces stimuli testent donc plus spécifiquement la voie dorsale.

Ainsi, la voie ventrale permet de diminuer la charge cognitive, en donnant accès directement au sens, au lexique mais les mots peuvent également être reconnus uniquement sur base de l'enveloppe de leurs variations temporelles^{4,5}. La voie dorsale peut donc elle aussi permettre de donner accès au sens.

3 Modèle de perception de la parole audio-visuelle

La perception de la parole dans la vie quotidienne est en général audio-visuelle. L'intégration audio-visuelle est un processus central permettant d'améliorer la perception de la parole dans différentes conditions d'écoute et que les sujets soient normo- ou malentendants. Chez les sujets normo-entendants elle est plus particulièrement utile lorsque les messages acoustiques ou visuels de la parole sont mal définis. Dans le bruit, elle permet également d'améliorer l'intelligibilité en apportant un gain équivalent à une élévation du rapport signal/bruit pouvant atteindre 5 dB. Or chaque dB d'amélioration de ce rapport, permet d'augmenter de 10 % l'intelligibilité de la parole dans le bruit⁶. Enfin, en cas de surdité, il est admis que l'intégration audio-

visuelle permet une meilleure perception de la parole. La **Figure 1** montre bien le gain apporté par la lecture labiale chez les sujets normo-entendants et sourds. Cette capacité d'intégration diminue entre 20 et 80 ans.

Ces effets positifs sont obtenus lorsque les informations auditives et visuelles sont concordantes. Lorsqu'elles ne le sont pas, on peut assister à différents type de perceptions : une capture auditive (on perçoit ce qu'on entend), une capture visuelle (on perçoit ce qu'on voit), ou une perception « intégrée » (on perçoit quelque chose qui intègre l'information donnée par la lecture labiale et par l'audition). Dans ce dernier cas, appelé effet McGurk, on perçoit un phonème ou un mot totalement différent, né de la fusion entre les 2 stimuli (par exemple : « ba » vu, + « ga » entendu = « da » perçu) ou une association des 2 stimuli (« bga » perçu).

Récemment, Bernstein⁷ a décrit un modèle de perception audio-visuelle de la parole utile en clinique⁵. Il est basé sur un réseau fronto-pariéto-temporo-occipital, comparable à la voie dorsale décrite précédemment, comprenant 3 nœuds importants : la région postérieure des sulcus et gyrus temporal supérieur (traitement des stimuli changeant rapidement), les gyrus cingulaire et supra-marginal à gauche plus qu'à droite (sensibilité à la concordance), le gyrus frontal inférieur ainsi que les aires prémotrice et motrice primaire adjacente⁸. Ces différentes régions cérébrales s'activent de façon synchronisée. La condition audiovisuelle incongruente stimule donc plus spécifiquement une partie de cette voie dorsale à gauche plus qu'à droite. Ainsi, les tests d'intégration audio-visuelle congruente ou non semblent permettre d'étudier plus spécifiquement la voie dorsale (ou phonologique) de la perception de la parole. Dans ce modèle, l'activation des aires frontales et motrices jouerait un rôle dans la comparaison entre les entrées sensorielles et les configurations mémorisées des informations auditives-visuelles-proprioceptives-motrices qui seraient activées si l'auditeur avait dû produire ce son de parole (voir plus loin). L'aire de Broca intervient dans l'analyse phonétique fine⁸. Les neurones miroirs interviendraient également dans ce processus.

L'activation des zones cérébrales susmentionnées est beaucoup plus intense en stimulation audiovisuelle qu'en

condition de stimulation auditive isolée et elle l'est encore moins en condition de stimulation visuelle isolée. L'intégration audio-visuelle fait intervenir dans certaines conditions plus spécifiquement l'hémisphère droit et plus particulièrement la région frontale droite comme le montrent les études réalisées en IRM fonctionnelle (fMRI)^{9,10}.

Ainsi, la voie ventrale serait le lieu où se produit la complémentarité entre les informations visuelles et auditives alors que la voie dorsale serait le lieu de corrélation entre les deux modalités d'information⁸.

Ce qui est vu influence la perception. L'image labiale vue va activer une liste limitée de phonèmes ou de mots en mémoire. Lorsque les informations sont concordantes, la perception du mot ou du phonème va être facilitée (intégration audio-visuelle) alors que lorsqu'elles ne le sont pas, comme c'est le cas dans l'effet McGurk, l'information auditive ne correspond à aucun des phonèmes ou mots de la liste activés par la vision. Ainsi, ce sont les processus perceptifs centraux qui sélectionnent en favorisant une perception intégrée (illusion) ou une capture auditive ou visuelle.

En outre, la reconnaissance de la parole est facilitée lorsque la voix est connue, ou que l'on sait d'où elle provient mais aussi si le contexte est connu. Cela est possible grâce à une facilitation d'origine supérieure qui s'effectue sur les informations entrantes (phénomène du « top-down »). La perception est également favorisée si le message est bien articulé, produit à un débit correct, avec un bon rapport signal/bruit (phénomène du « bottom-up »). En revanche, la charge cognitive augmente si les conditions d'écoute sont défavorables.

Il est enfin important de noter que les traitements phonologique, lexical, syntaxique et pragmatique sont réalisés en parallèle et non consécutivement¹¹.

4

Développement (ou maturation) de la perception audio-visuelle de la parole

Ce circuit complexe qui se construit progressivement peut être comparé au réseau fonctionnel vestibulaire central. En effet, l'équilibre est contrôlé par des processus vestibulaires centraux qui comparent en permanence les entrées sensorielles utiles (vision, vestibule, proprioception - somesthésie) avec les configurations construites par les expériences sensori-motrices que le sujet a progressivement mis en mémoire depuis sa naissance : il a appris à tenir sa tête, s'asseoir, ramper, marcher dans différentes conditions. Tant que les entrées correspondent à des événements connus, le contrôle de l'équilibre est passif et se réalise dans des conditions écologiques et économiques, consommant peu de ressources cognitives. Le modèle de perception de la parole pourrait être tout à fait comparable à celui du contrôle de l'équilibre. L'enfant met progressivement en mémoire des configurations de stimulations auditives - visuelles - somesthésiques - motrices, créées par la vision et l'audition des personnes qui parlent dans son entourage, mais aussi par ses propres productions vocales qui se complexifient au fur et à mesure (au départ, émission de quelques sons mal différenciés, puis de voyelles, de syllabes, de mots, et enfin de phrases de plus en plus complexes). Il met progressivement en mémoire des configu-

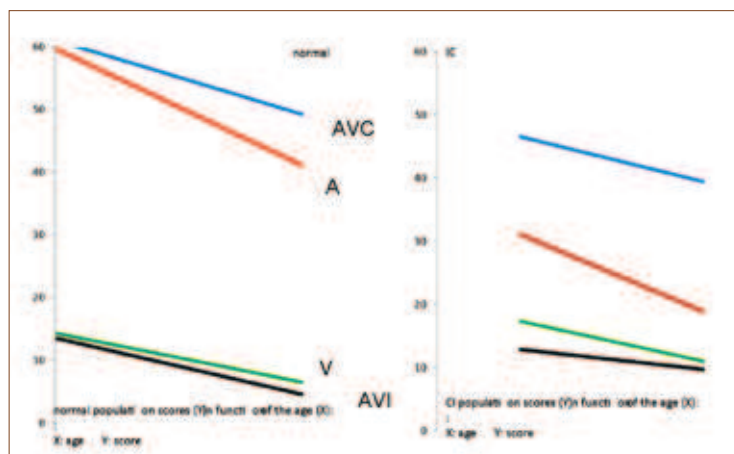


Figure 1. Effet de l'âge sur la perception de mots présentés en condition audition seule (A), vision seule (V), audiovisuelle concordante (AVC), audiovisuelle non concordante (AVI) chez des adultes normo-entendants (à gauche) et implantés cochléaires (à droite) (données personnelles Deggouj)

rations de stimulations auditives, visuelles, somesthésiques et motrices associées à la production de ces sons. Ces mêmes configurations sont également activées lorsque le sujet perçoit ces mêmes vocalisations. L'ensemble serait donc combiné dans un code articulo-phonologique¹².

Il devient évident que pour développer ces processus auditifs centraux de perception de la parole, il faut pouvoir développer les circuits nerveux qui les sous-tendent : présence du matériel génétique nécessaire à cette construction, absence de lésions cérébrales acquises touchant ces circuits. Il faut également que le sujet soit soumis à une stimulation sonore (musicale) et langagière immédiate, adéquate et soutenue. Son audition et ses productions doivent être entraînées et développées dans le plaisir de la communication. Il faut enfin que les informations sensorielles entrantes soient correctes : bonne audition, bonne vision, bonnes perceptions somesthésiques, bon contrôle moteur. En cas d'atteintes lésionnelles ou de manque de stimulations adéquates, il est compréhensible que ces processus ne se mettent pas correctement en place.

Dans ce modèle, l'intervention de l'aire de Broca, qui peut être activée par les actions motrices programmées ou vues, laisse supposer que l'association entre troubles moteurs et troubles de développement du langage oral et écrit n'est pas que fortuite ou liée à une co-morbidité. Il pourrait s'agir d'une atteinte spécifique de réseaux neuronaux incriminés dans les 2 traitements : perception de la parole et contrôle psychomoteur. En effet 59 % des enfants dyslexiques présentent des troubles moteurs¹³.

On sait enfin que le nourrisson est sensible aux différences de phonèmes de toutes les langues. Progressivement, il va perdre cette compétence pour ne développer que la perception correcte des phonèmes de la langue à laquelle il est exposé, ce qui va donc modifier la maturation des processus auditifs centraux. Elle agit donc sur une capacité fondamentale : la perception catégorielle des phonèmes.

5

Développement de la perception catégorielle phonémique.

Si des caractéristiques acoustiques des phonèmes, tels que le VOT ou les fréquences de transition, sont modifiées progressivement, le sujet va passer de la perception d'un phonème à un autre et ainsi changer de catégorie. Ce phénomène est observable par exemple avec le voisement qui repose principalement sur le VOT (temps entre le relâchement de l'occlusion et la mise en vibration des cordes vocales). En modifiant progressivement le VOT au sein d'un continuum, à un certain niveau de changement, on passe brusquement de la perception d'un « da » à celle d'un « ta ». Cela s'observe pour le « ba » et le « pa ». Plusieurs sauts de VOT peuvent se produire sans que le sujet ne change de perception phonémique (catégorie). Ce mécanisme fondamental nous permet de distinguer clairement un même phonème produit par des personnes différentes, avec des modulations de voix différentes, des articulations et des accents différents. La perception du phonème reste adéquate malgré les changements des caractéristiques acoustiques. Le sujet normal présente donc une perception catégorielle bien tranchée et une perception minimale des changements acoustiques en intra-catégoriel^{14,16}.

La perception catégorielle des phonèmes est déjà présente chez des nourrissons de 1 mois¹⁷. Toutefois, la frontière permettant de changer de catégories phonémiques est différente entre les nouveau-nés et les adultes. Les nouveau-nés utilisent les frontières universelles permettant de détecter des changements temporels de stimulations. Il s'agit de gap, ou VOT pour le voisement, de -30 et +30 msec. Ces frontières universelles de VOT sont innées et ne sont spécifiques ni à la parole ni aux humains. Les processus auditifs centraux utilisent cette prédisposition innée à détecter ces gaps temporels, pour développer un système permettant de coder catégoriellement les phonèmes. Dans un second temps, les jeunes enfants vont développer des compétences pour détecter les frontières catégorielles de VOT spécifiques de leur langue maternelle. Ainsi, en français, néerlandais, arabe, espagnol et hindi, la frontière de VOT permettant un changement de catégorisation est à 0 msec. En Anglais, elle est à +30 msec^{14,16,18}. La bascule des processus auditifs centraux de la perception selon les frontières universelles à celle selon les frontières propres à la langue maternelle a lieu vers 6 mois¹⁷. A ce moment, les frontières universelles de détection des gaps à +30 et -30 msec persistent dans les processus centraux qui continuent à détecter des changements physiques de stimulations acoustiques. En revanche, elles ne sont plus utilisées par le système perceptuel pour marquer un changement de catégorie de phonèmes. Cela est démontré par les tests psycho-acoustiques ou par l'enregistrement d'une Négativité de Discordance (MMN : MisMatch Negativity = potentiel négatif produit automatiquement, même si le sujet n'y prête pas attention, par les voies auditives centrales lorsqu'elles détectent un changement de stimulus acoustique) en cas de détection de changement de phonème¹⁸. Sharma a présenté à des personnes parlant anglais ou hindi, un continuum de stimuli, dont le VOT changeait de -90 à 0 msec. Ceci permettait aux hindiphones de passer de la perception d'un « ba » à un « pa ». En revanche, les anglophones, ayant une frontière spécifique catégorielle à +30 msec, ne vont pas percevoir de changement de phonème. Les anglophones et hindiphones ont des réponses N1b comparables laissant penser que leurs voies auditives centrales détectent bien le changement de VOT. En revanche, seuls les hindiphones montrent une MMN liée au changement de catégorie phonémique. Leurs processus auditifs centraux ont bien détecté le changement de catégorie phonémique, comme prévu dans leur langue.

Ces résultats montrent donc qu'il faut distinguer d'une part, la capacité des voies auditives centrales à détecter un changement de stimulus, et d'autre part, la capacité des processus centraux à catégoriser correctement les phonèmes en fonction des caractéristiques physiques spécifiques de la langue « maternelle ». Il est donc possible qu'une seule de ces capacités ou que les deux soient atteintes chez les sujets présentant des troubles des processus auditifs centraux.

6

Développement de l'intégration audio-visuelle

La capacité à détecter une incongruence entre des informations phonémiques visuelles et auditives a été mise en évidence déjà chez des nourrissons de 5 mois par la

méthode des PEA (potentiels évoqués auditifs) et du temps de fixation²⁰. Chez les enfants la région temporale postéro-supérieure est activée plus fortement en condition audio-visuelle que chez les adultes. Avec le temps, cette activation diminue en condition audio-visuelle incongruente²¹. D'autre part, dans cette situation, les enfants produisent plus de capture auditive. La voie dorsale d'intégration audio-visuelle de la parole mûrit donc progressivement, jusqu'à la fin de l'adolescence^{21,22}. Il faut donc s'attendre à ce que des tests utilisant des analyses phonologiques, des tests d'audition dans le bruit et/ou d'intégration audio-visuelle, montrent une maturation, au moins jusqu'à la fin de l'adolescence.

En pathologie, les enfants avec des troubles phonologiques font plus de captures auditives que les enfants normaux ou les enfants présentant d'autres troubles de langage^{9,23,24}.

Lors du vieillissement l'intégration audio-visuelle diminue. Les sujets âgés vont présenter plus de capture visuelle en situation d'incongruence audio-visuelle si on les teste sans attirer leur attention sur une modalité²¹. En revanche, s'il leur est demandé de répéter ce qu'ils voient dans cette situation incongruente, ils présentent plus de capture auditive (**Figure 1**). Tout se passe donc comme si les personnes âgées étaient moins performantes en intégration et choisissaient une modalité de perception : celle sur laquelle leur attention n'est pas dirigée.

7

Audition dichotique et latéralisation hémisphérique

Comme écrit précédemment, les réseaux neuronaux activés dans des tâches de perception de la parole sont distribués bilatéralement, mais avec une prédominance du côté gauche. Anatomiquement, le planum temporal gauche est plus étendu que le droit²⁵. D'autres régions corticales impliquées dans le traitement du langage sont asymétriques. Ces données anatomophysiologiques sont en concordance avec la notion bien connue que l'oreille droite est dominante dans le traitement du langage dans le silence.

Cette dominance de l'oreille droite se manifeste aussi pour les tâches auditives verbales. Ainsi chez les adultes, les performances de l'oreille droite sont légèrement supérieures à celles de l'oreille gauche. En revanche, la prédominance est en faveur de l'oreille gauche pour les tâches non verbales²⁶. Ces dominances évoluent avec l'âge puisque chez les enfants, entre 5 à 12 ans, la dominance de l'oreille droite diminue progressivement. Cette diminution s'explique par l'amélioration des performances de l'oreille gauche, principalement pour les stimuli linguistiques lourds (phrases)²⁷. Chez les enfants avec troubles des processus auditifs centraux, la dominance de l'oreille droite est plus nette par détérioration des performances de l'oreille gauche. On retrouve une dominance plus grande de l'oreille droite chez les enfants avec des troubles d'apprentissage. Chez l'adulte, au-delà de 45 ans, la prédominance de l'oreille droite augmente en relation avec une dégradation des performances de l'oreille gauche.

Enfin chez les bilingues, la dominance droite pour les tests de langage semble différente. Lorsqu'ils sont testés

dans leur deuxième langue, ils présenteraient une dominance droite moindre par diminution des performances de leur oreille droite, les performances de leur oreille gauche restant inchangées²⁸.

8

Audition dans le bruit

L'audition dans le bruit recruterait plus l'hémisphère droit²⁹ avec des réponses hémisphériques droites et gauches différentes selon la nature de masque. Elle décline chez les personnes âgées car le vieillissement toucherait plus l'hémisphère droit et les connexions inter hémisphériques^{30,31}. La discrimination auditive dans un bruit fluctuant est meilleure que dans un bruit continu en raison du démasquage produit par les périodes de diminution d'intensité du bruit (écoute dans les vallées)⁵. Cette capacité se développe et s'améliore progressivement pendant l'enfance. Les enfants sont en effet plus sensibles au bruit que les adultes ayant besoin de rapports Signal/Bruit plus favorables. Ainsi, alors qu'à 8 ans, leur niveau de discrimination dans le silence est équivalent à celui des adultes, dans le bruit, ils n'atteignent un niveau équivalent qu'à partir de l'âge de 11 ans³² et la reconnaissance des mots dans le bruit doit encore se développer au long de l'adolescence.

Ces moindres performances d'écoute dans le bruit observées chez les enfants normaux pourraient s'expliquer par une moins bonne détection des enveloppes temporelles de stimuli langagiers comparés à celle des adultes. Elles peuvent également s'expliquer par le manque de maturation des circuits neurologiques permettant d'utiliser la distribution spatiale des sources sonores pour supprimer un message non désiré (en particulier lorsque le message et le bruit ne proviennent pas de la même direction)³³.

Si on tient compte du fait que l'enfant a besoin d'un rapport S/B élevé pour comprendre, on explique mieux la pertinence des mesures visant à éviter le bruit compétitif lors des phases d'apprentissage du langage oral (stimulation du langage) ou écrit (cadre scolaire). Cela ne veut pas dire que le bruit doive en permanence être exclu car il pourrait stimuler également certains processus auditifs centraux comme les « filtres » perceptifs permettant d'extraire l'information utile dans le bruit.

9

Plasticité du cortex auditif et apprentissage

Le cortex auditif se construit en fonction des expériences sensorielles rencontrées. Ce mécanisme commence *in utero* (développement) mais se maintient pendant toute la vie (maturation avec adaptation et apprentissage).

Des études réalisées par Näätänen et son équipe ont montré que déjà *in utero*, les voies auditives centrales du fœtus produisent une MMN lorsqu'ils sont soumis à un changement de mélodie ou de parole³⁴. Les fœtus entraînés à entendre une langue « inconnue » des parents *in utero*, y restent sensibles plusieurs mois après la naissance. Ainsi, les processus auditifs centraux commencent leur mode-
lage très précocement sur la ou les langues auxquelles le

sujet est exposé. Ce processus se poursuit tout au long du développement du langage. Le cortex immature montre des neurones avec un réglage imprécis au niveau fréquentiel. C'est l'expérience auditive pendant une période critique qui permet d'affiner le réglage neuronal. Ce modelage auditif central par l'environnement a été étudié sur des animaux exposés à des environnements sonores manipulés : par exemple, l'exposition à une fréquence entraîne sa surreprésentation corticale³⁵.

L'apprentissage favorise certaines réponses auditives corticales. Le moteur de tout apprentissage est la recherche d'une récompense (ou plaisir) ou l'évitement d'une punition (ou désagrément). Il s'agit de réponses motrices à l'origine. Les réponses sensorielles corticales favorisées sont en lien avec des comportements moteurs, c'est à dire ceux qui augmentent les chances d'avoir une récompense ou qui diminuent les risques d'une punition³⁶. Encore une fois, on voit le lien qui peut exister entre perceptions sensorielles et patterns de réponses motrices. Fritz fait l'hypothèse que le système moteur exerce un contrôle « top-down », qui ne donne pas d'acte moteur visible mais qui modifie, influence les filtres perceptuels. Ce système sélectionne l'entrée sensorielle la plus utile pour une action future, cette action pouvant être la perception ou la production du langage.

10

Développement des potentiels évoqués auditifs tardifs (PEAT)

Les différentes composantes des PEAT mûrissent à une vitesse différente (**Figure 2**).

Chez l'adulte, les PEAT sont caractérisés par une négativité autour de 100 msec (N1) et une positivité moins ample autour de 180 msec (P2). Les réponses sont totalement différentes chez les jeunes enfants avec une onde positive (P1) suivie par une onde négative (N2). Chez le nouveau-né, les latences de ces ondes sont respectivement de 200 et 400 msec alors que chez les enfants de 1 à 3 ans, la latence de la positivité est de 100 msec, suivie par une onde négative à 250 msec et une autre à 450 msec. L'onde N1 commence à émerger au centre de l'onde P1 à l'adolescence, et augmente progressivement avec l'âge alors que dans le même temps l'amplitude de l'onde N2 diminue progressivement. Jusqu'à 11 ans le complexe P1N2 domine. Cette onde N2 reste toutefois encore bien présente à l'adolescence et les adolescents ont donc encore des réponses auditives tardives de type « pédiatrique »^{36,38}. L'onde P1 diminue d'amplitude et de latence avec la maturation. Sa diminution de latence est corrélée avec le développement du langage^{38,41}. La maturation de N1 est plus rapide pour les sons langagiers (vers 13-14 ans) que pour les stimulations tonales (vers 15-16 ans)³⁹. L'exposition à un entraînement auditif modifie les réponses PEAT chez les jeunes enfants^{39,26} ce qui est à l'image de ce qui a été décrit chez les animaux où le codage tonotopique cortical est modifié par l'entraînement auditif à une fréquence donnée⁴¹.

Ces changements de morphologie des PEAT chez les enfants peuvent être favorisés par les changements volumétriques importants de la cyto-architecture cérébrale pendant l'enfance, par les maturations synaptiques et la myélinisation

croissante. Ils pourraient également être liés à des modifications fonctionnelles avec changement de périodes réfractaires des neurones entre l'enfance et l'âge adulte³⁶.

L'augmentation de la fréquence de récurrence des stimulations a un effet sur les réponses corticales, les adolescents et adultes ne présentant plus qu'une onde N1. En revanche, les enfants plus jeunes gardent les ondes P1 et N2. Le traitement de stimuli présentés à grande récurrence demande donc une maturation. Il est dès lors utile de ralentir le débit de parole pour favoriser l'apprentissage de la langue ou pour aider les sujets présentant des troubles des processus auditifs centraux. Cette maturation auditive centrale peut montrer des différences chez les enfants avec difficultés d'apprentissage. Leur latence de P1 peut être augmentée de façon isolée. La latence de P1 peut être normale avec augmentation de latence de N1P2. Les amplitudes peuvent être faibles. Ils peuvent également présenter des réponses normales^{42,43}. Par ailleurs, la MMN est moins ample. Très récemment, il a été observé qu'elle est anormale chez des enfants pré-linguaux présentant des antécédents familiaux de dyslexie (Nätänen, présentation congrès NHS 2010).

11

Effet de la maturation sur les résultats des tests cliniques psycho-acoustiques utilisés pour mesurer les processus auditifs centraux

Dans cette partie, nous allons présenter l'évolution en fonction de l'âge des compétences mesurées à l'aide des tests auditifs centraux utilisés en clinique. Plusieurs d'entre eux ont été regroupés par JP et L Demanez dans la batterie auditive centrale (BAC)⁴⁵.

11.1 Discrimination de configurations variables en fréquence et en durée

La discrimination des configurations fréquentielles et temporelles s'améliore avec le temps chez les jeunes enfants (**Figure 3**) atteignant les valeurs adultes après l'âge de 10 ans. Le changement de scores à 8 ans est dû à un changement de modalité de test : les enfants plus jeunes peuvent fredonner les sons entendus alors que les enfants plus âgés doivent les verbaliser. Ces courbes montrent que la détection correcte des configurations variables en durée (250 et 500 msec) mûrissent plus lentement que la détection correcte des configurations variables en fréquence (880 et 1122 Hz). Il faut donc s'attendre à une maturation plus lente de la reconnaissance des phonèmes sur leurs caractéristiques de changement de durée (le voisement par exemple), que sur leur contenu spectral. On peut également attendre plus de difficultés d'audition dans le bruit chez les

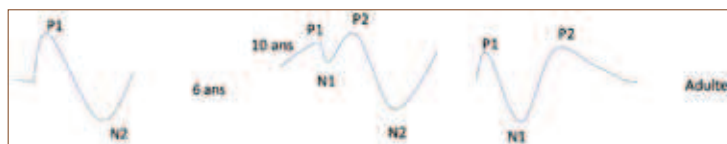


Figure 2. Évolution des potentiels évoqués auditifs tardifs (provoqués par un seul type de stimulus) chez l'enfant

enfants plus jeunes puisqu'ils sont moins performants dans l'utilisation des indices temporels, comme déjà abordé. Il y a plus de 30 ans, Tallal a émis l'hypothèse que les troubles d'apprentissage étaient sous tendus par un déficit dans la détection de changements rapides de stimulation au niveau temporel⁴⁵. Les enfants dyslexiques détectent moins bien les modulations de bruit blanc et les enveloppes temporelles de mots que les enfants normaux⁵. Ces difficultés seraient à la base d'une mauvaise analyse phonologique.

11.2 Catégorisation phonémique

La catégorisation phonémique s'améliore également avec le temps pour arriver à une catégorisation très tranchée¹⁷, les sujets dyslexiques présentant une perception catégorielle moins tranchée (cf. Evelyne Veuillet, tome II).

11.3 Tests de parole dans le silence et dans le bruit

Compte tenu de tout ce qui a été vu plus haut, on comprend que les tests les plus sensibles pour diagnostiquer un trouble des processus centraux de l'audition chez les enfants de 8 à 10 ans normaux soient ceux utilisant de façon plus importante la voie dorsale comme par exemple la répétition de pseudomots et les tests de la parole dans le bruit⁴⁸. Demanez et al. a suivi, chez les enfants, la maturation des tests phonologiques de Lafon dans le silence et le bruit (**Figure 4**) et a montré que la discrimination phonémique dans le bruit atteint le niveau des adultes vers 12 ans.

11.4 Interaction binaurale

Si un son et un bruit n'arrivent pas en phase dans les deux

oreilles, les processus auditifs centraux permettent l'utilisation de ce déphasage pour améliorer le rapport S/B et ainsi rendre audible le son malgré le bruit de fond. Il s'agit d'un démasquage qui se produit très bas dans les voies auditives, au niveau du tronc cérébral (complexe olivaire supérieur). Cette capacité à utiliser le déphasage inter-auriculaire pour améliorer l'audition dans le bruit peut être étudiée en clinique par le MLD (Masking Level Difference Test) ou test de démasquage. Dans ce test la parole et le bruit sont dans un premier temps présentés en phase. Dans un second temps le bruit est toujours présenté en phase mais la parole l'est en opposition de phase. Les scores entre les 2 conditions sont soustraits, permettant de mesurer le gain amené par le déphasage. Il est supérieur à 2.5 dB chez l'adulte. Cette compétence s'améliore rapidement chez le jeune enfant, pour atteindre les valeurs adultes à partir de 5 à 6 ans. (**Figure 5**).

11.5 Tests dichotiques

L'adjectif « dichotique » est issu de deux racines : dikha (en deux) et ous, otos (oreille). Une écoute dichotique est donc une écoute « à 2 oreilles ». Un test dichotique consiste à présenter simultanément à chaque oreille un stimulus différent.

Ces stimuli peuvent être de nature verbale (mots, chiffres, syllabes, phrases, etc.) ou non verbale (mélodies, bruits environnementaux, etc.). Si le matériel utilisé est signifiant (mots ou phrases), il est impératif qu'il soit équilibré quant à ses aspects acoustiques, phonétiques, linguistiques et sémantiques. L'audition du sujet doit bien sûr se situer dans les limites de la normale mais surtout ne pas être asymétrique.

Selon les modalités utilisées, le sujet doit répéter les deux éléments de la paire (« oreille non désignée ») ou seulement l'un des deux (« oreille désignée »).

Dans le Bilan Auditif Central de Demanez et al.⁴⁹, il a été sélectionné un lot de substantifs, adjectifs, chiffres et syllabes, chacun couplé en série de 1 à 3 items afin de créer 5 listes de 10 paires de difficultés croissantes.

Chez l'adulte, l'épreuve est constituée, par ordre de difficulté croissante, de 2 séries d'un substantif dissyllabique (« râteau » et « lapin »), d'une série de 2 chiffres (« 5-6 » et « 8-10 ») et d'une autre de 3 chiffres (« 5-6-4 » et « 8-10-3 »), et enfin d'une série de 2 adjectifs monosyllabiques (« brun-doux » et « grand-beau »).

Chez l'enfant, la série de 3 chiffres est remplacée par une série d'un chiffre (« 8 » et « 5 »), et celle de 2 adjectifs monosyllabiques par une série de monosyllabes (« bi » et « da »).

L'épreuve complète porte ainsi sur 50 paires de séries d'items présentées successivement mais dans un ordre aléatoire avec une consigne d'oreille désignée (« répétez l'item perçu à droite ») et d'oreille non désignée (« répétez les deux items perçus respectivement à droite et à gauche »). L'aptitude dichotique en pour-cent s'évalue par le nombre de séries d'items correctement reproduites en consigne « oreille non désignée » additionné de la moyenne des séries d'items correctement reproduites en consigne « oreille droite désignée » et « oreille gauche désignée ».

La dominance d'une oreille est évaluée et son degré de signification précisé par l'application du test statistique de Mc Nemar. Seules les réponses asymétriques observées en

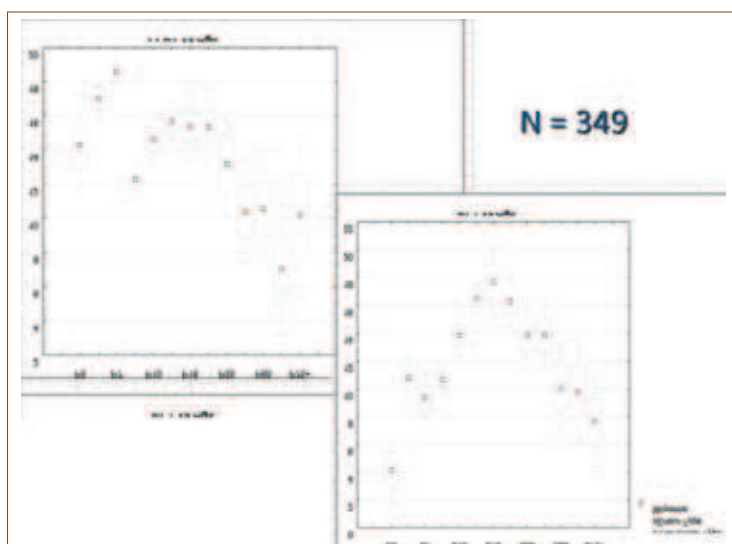


Figure 3. Évolution de la perception des configurations variables en fréquence (PPST-Pitch Pattern Stimuli Test), et en durée (DPT – Duration Pattern Test) en fonction de l'âge : étalonnage sur 349 individus « sains » (sans plainte). Les performances s'améliorent dans l'enfance pour n'atteindre des valeurs adultes vers 12 ans. Les résultats avant 7 ans sont meilleurs car les tests utilisés, adaptés à l'âge, sont plus simples (avant 7 ans il est demandé de fredonner la réponse et non pas de la verbaliser). Notons que chez les adultes, les performances chutent assez rapidement avec l'âge : dès 55 ans pour les PPST et nettement à 65 ans pour les DPT. (réf :49)

consigne d'« oreille non désignée » doivent être prises en compte : présentes à droite et absentes à gauche (D) ou inversement (G).

Le test statistique vaut $\frac{D-G}{\sqrt{D+G}}$ et il répond à une distribution normale (significatif à 0,05 s'il est supérieur ou égal à 1,96). Les épreuves dichotiques montrent également des signes de maturation de l'aptitude dichotique due à l'amélioration des performances de l'oreille gauche (**Figure 6**). Les scores dichotiques atteignent les valeurs adultes à 16 ans. Le brusque changement de valeurs entre 7 et 8 ans est dû au changement de modalité de test.

12 Conclusions

Les processus centraux, qui permettent de détecter et discriminer correctement la parole surtout dans les conditions non idéales d'écoute, se mettent progressivement en place dès la période fœtale. Après avoir atteint un plateau, ils vont décliner avec l'âge. Leur développement correct nécessite un bagage génétique adéquat, une intégrité physique des réseaux neuronaux impliqués, une exposition adéquate et précoce à des stimulations acoustiques et langagières auditives, visuelles, somesthésiques et motrices. Leurs déficits se marquent principalement dans des conditions d'écoute non idéales (le bruit, les conversations multiples). Néanmoins la redondance importante des informations leur permet précisément de résister à de nombreux déficits, y compris génétiques. La stimulation (sous forme d'entraînements) permet de récupérer au moins partiellement des anomalies développementales de discrimination des configurations fréquentielles, d'intensité, ou phonémiques chez les enfants prédisposés génétiquement à des troubles d'apprentissage. Le manque de stimulation adéquat à un moment précoce peut avoir conséquences sur leur développement des processus auditifs centraux.

13 Bibliographie

1. Central auditory processing : technical report. Working Group on Auditory Processing Disorders. American Speech-Language-Hearing Association. (1996, 2005). <http://www.asha.org/docs/html/TR1996-00241.html>
2. Farivar R, Blanke O, Chaudhuri A. Dorsal-ventral integration in the recognition of motion-defined unfamiliar faces. J Neurosci. 2009 ; 29(16) : 5336-42.
3. Zaehle T, Geiser E, Alter K, Jancke L, Meyer M. Segmental processing in the human auditory dorsal stream. Brain Res. 2008 ; 1220 : 179-90.
4. Souza PE, Turner CW. Effect of single-channel compression on temporal speech information. J Speech Hear Res. 1996 ; 39(5) : 901-11.
5. Lorenzi C, Dumont A, Füllgrabe C. Use of temporal envelope cues by children with developmental dyslexia. J Speech Lang Hear Res. 2000 ; 43(6) : 1367-79
6. Summerfield Q. Lipreading and audio-visual speech perception. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci. 1992 ; 335(1273) : 71-8.
7. Bernstein LE, Auer ET Jr, Wagner M, Ponton CW. Spatiotemporal dynamics of audiovisual speech processing. Neuroimage. 2008 1 ; 39 (1) : 423-35.
8. Campbell R. The processing of audio-visual speech: empirical and neural bases. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci. 2008 ; 363(1493) : 1001-10

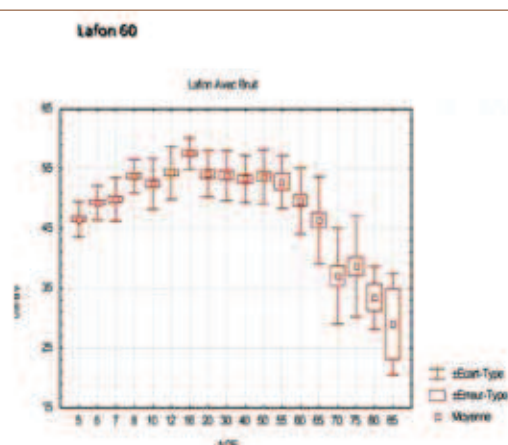


Figure 4. Évolution de la perception des phonèmes dans le bruit (test de Lafon) avec l'âge : étalonnage sur 666 individus « sains » (sans plainte).

La discrimination dans le bruit s'améliore progressivement jusqu'à l'âge de 10-12 ans, reste stable jusqu'à l'âge de 55 ans où s'amorce un déclin progressif. (réf :49)

Masking Level Difference maturation

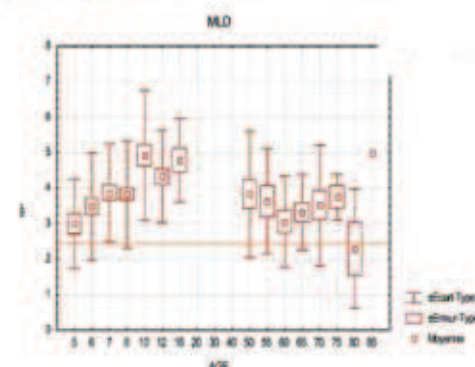


Figure 5. Évolution du test de démasquage (Masking Level Difference - MLD) avec l'âge : étalonnage sur 348 individus « sains » (sans plainte).

Cette capacité s'améliore progressivement chez les enfants pour atteindre les valeurs adultes vers 7 ans. (réf :49)

Aptitudes Dichotiques maturation

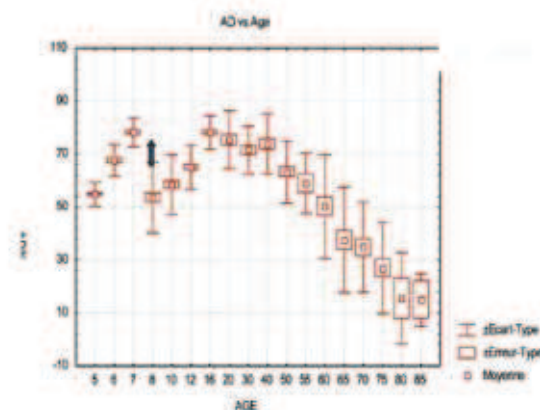


Figure 6. Évolution des tests dichotiques avec l'âge : étalonnage sur 666 individus « sains » (sans plainte).

Les tests utilisés chez les enfants < 8 ans sont plus simples, expliquant la rupture de courbe. Chez les enfants, les aptitudes dichotiques s'améliorent avec l'âge pour atteindre des valeurs stables vers 16 ans. Chez les adultes, elles déclinent progressivement dès l'âge de 45 ans. (réf :49)

9. Hertrich I, Dietrich S, Ackermann H. Cross-modal interactions during perception of audiovisual speech and nonspeech Signals : An fMRI Study. *J Cogn Neurosci*. 2010 Jan 4
10. Saint-Amour D, De Sanctis P, Molholm S, Ritter W, Foxe JJ. Seeing voices: High-density electrical mapping and source-analysis of the multisensory mismatch negativity evoked during the McGurk illusion. *Neuropsychologia*. 2007 ; 45(3) : 587-97.
11. Hagoort P. The fractionation of spoken language understanding by measuring electrical and magnetic brain signals. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*. 2008 ; 363(1493) : 1055-69.
12. Dodd B, McIntosh B, Erdener D, Burnham D. Perception of the auditory-visual illusion in speech perception by children with phonological disorders. *Clin Linguist Phon*. 2008 ; 22(1) : 69-82
13. Ramus F. Neurobiology of dyslexia: a reinterpretation of the data. *Trends Neurosci*. 2004 ; 27(12):720-6
14. Serniclaes W, Sprenger-Charolles L, Carré R, Demonet JF. Perceptual discrimination of speech sounds in developmental dyslexia. *J Speech Lang Hear Res*. 2001 ; 44(2) : 384-99
15. Hoonhorst I, Serniclaes W, Collet G, Colin C, Markessis E, Radeau M, Deltenre P. N1b and Na subcomponents of the N100 long latency auditory evoked-potential : neurophysiological correlates of voicing in French-speaking subjects. *Clin Neurophysiol*. 2009 ; 120(5) : 897-903
16. Hoonhorst I, Colin C, Markessis E, Radeau M, Deltenre P, Serniclaes W. French native speakers in the making: from language-general to language-specific voicing boundaries. *J Exp Child Psychol*. 2009 ; 104(4):353-66
17. Eimas PD, Siqueland ER, Jusczyk P, Vigorito J. Speech perception in infants. *Science*. 1971 ; 171(968): 303-6
18. Lisker L, Liberman AM, Erickson DM, Dechovitz D, Mandler R. On pushing the voice-onset-time (vot) boundary about. *Lang Speech*. 1977 ; 20(3) : 209-16.
19. Sharma A, Dorman MF. Neurophysiologic correlates of cross-language phonetic perception. *J Acoust Soc Am*. 2000 ; 107(5 Pt 1) : 2697-703.
20. Kushnerenko E, Teinonen T, Volein A, Csibra G. Electrophysiological evidence of illusory audiovisual speech percept in human infants. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2008 ; 105(32) : 11442-5.
21. Cienkowski KM, Carney AE. Auditory-visual speech perception and aging. *Ear Hear*. 2002 ; 23(5) : 439-49
22. Tremblay C, Champoux F, Voss P, Bacon BA, Lepore F, Théoret H. Speech and non-speech audio-visual illusions: a developmental study. *PLoS One*. 2007 ; 2(1) : e742
23. Norrix LW, Plante E, Vance R, Boliek CA. Auditory-visual integration for speech by children with and without specific language impairment. *J Speech LangHear Res*. 2007 ; 50(6) : 1639-51
24. Hayes EA, Tiippana K, Nicol TG, Sams M, Kraus N. Integration of heard and seen speech: a factor in learning disabilities in children. *Neurosci Lett*. 2003 ; 351(1) : 46-50
25. Galaburda AM, Sherman GF, Rosen GD, Aboitiz F, Geschwind N. Developmental dyslexia : four consecutive patients with cortical anomalies. *Ann Neurol*. 1985 ; 18(2) : 222-33
26. Tervaniemi M, Castaneda A, Knoll M, Uther M. Sound processing in amateur musicians and nonmusicians: event-related potential and behavioral indices. *Neuroreport*. 2006 ; 17(11) : 1225-8
27. Bellis TJ, Billiet C, Ross J. Hemispheric lateralization of bilaterally presented homologous visual and auditory stimuli in normal adults, normal children, and children with central auditory dysfunction. *Brain Cogn*. 2008;66(3) : 280-9
28. Saleh S, Campbell NG, Wilson WJ. The performance of South African English first and second adult speakers on a «low linguistically loaded» central auditory processing test protocol. *S Afr J Commun Disord*. 2003 ; 50 : 19-25.
29. Scott SK, Rosen S, Beaman CP, Davis JP, Wise RJ. The neural processing of masked speech : evidence for different mechanisms in the left and right temporal lobes. *J Acoust Soc Am*. 2009 ; 125(3) : 1737-43.
30. Tadros SF, Frisina ST, Mapes F, Kim S, Frisina DR, Frisina RD. Loss of peripheral right-ear advantage in age-related hearing loss. *Audiol Neurotol*. 2005 ; 10(1) : 44-52
31. Martin JS, Jerger JF. Some effects of aging on central auditory processing. *J Rehabil Res Dev*. 2005 ; 42(4 Suppl 2) : 25-44.
32. Stuart A. Development of auditory temporal resolution in school-age children revealed by word recognition in continuous and interrupted noise. *Ear Hear*. 2005;26(1) : 78-88
33. Cameron S, Dillon H. The listening in spatialized noise-sentences test (LISN-S): comparison to the prototype LISN and results from children with either a suspected (central) auditory processing disorder or a confirmed language disorder. *J Am Acad Audiol*. 2008 ; 19(5) : 377-91
34. Huottilainen M, Kujala A, Hotakainen M, Parkkonen L, Taulu S, Simola J, Nenonen J, Karjalainen M, Näätänen R. Short-term memory functions of the human fetus recorded with magnetoencephalography. *Neuroreport*. 2005 ; 16(1) : 81-4
35. Dahmen JC, King AJ. Learning to hear: plasticity of auditory cortical processing. *Curr Opin Neurobiol*. 2007 ; 17(4) : 456-64.
36. Fritz J, Elhilali M, Shamma S. Active listening: task-dependent plasticity of spectrotemporal receptive fields in primary auditory cortex. *Hear Res*. 2005 ; 206(1-2) : 159-76
37. Sussman E, Steinschneider M, Gumenyuk V, Grushko J, Lawson K. The maturation of human evoked brain potentials to sounds presented at different stimulus rates. *Hear Res*. 2008 ; 236(1-2) : 61-79. Epub 2007 Dec 15.
38. Ponton CW, Eggermont JJ, Kwong B, Don M. Maturation of human central auditory system activity : evidence from multi-channel evoked potentials. *Clin Neurophysiol* 2000 ; 111(2) : 220-36.
39. Ventura LM, Costa Filho OA, Alvarenga Kde F. Central hearing system maturation in normally hearing children. *Pro Fono*. 2009 ; 21(2) : 101-7.
40. Poulsen C, Picton TW, Paus T. Age-related changes in transient and oscillatory brain responses to auditory stimulation during early adolescence. *Dev Sci*. 2009 ; 12(2) : 220-35.
41. Sharma A, Martin K, Roland P, Bauer P, Sweeney MH, Gilley P, Dorman M. P1 latency as a biomarker for central auditory development in children with hearing impairment. *J Am Acad Audiol*. 2005 ; 16(8) : 564-73.
42. Fujioka T, Ross B, Kakigi R, Pantev C, Trainor LJ. One year of musical training affects development of auditory cortical-evoked fields in young children. *Brain*. 2006 ; 129(Pt 10) : 2593-608.
43. Recanzone GH, Schreiner CE, Merzenich MM. Plasticity in the frequency representation of primary auditory cortex following discrimination training in adult owl monkeys. *J Neurosci*. 1993 ; 13(1) : 87-103
44. Gilley PM, Sharma A, Dorman M, Martin K. Abnormalities in central auditory maturation in children with language-based learning problems. *Clin Neurophysiol*. 2006 ; 117(9) : 1949-56.
45. Pinkerton F, Watson DR, McClelland RJ. A neurophysiological study of children with reading, writing and spelling difficulties. *Dev Med Child Neurol*. 1989 ; 31(5) : 569-81
46. Tallal P. Language disabilities in children : a perceptual or linguistic deficit ? *J Pediatr Psychol*. 1980 ; 5(2) : 127-40
47. Demanez L, Boniver V, Dony-Closon B, Lhonneux-Ledoux F, Demanez JP. Central auditory processing disorders : some cohorts studies. *Acta Otorhinolaryngol Belg*. 2003 ; 57(4) : 291-9.
48. Kraus N, McGee TJ, Carrell TD, Zecker SG, Nicol TG, Koch DB. Auditory neurophysiologic responses and discrimination deficits in children with learning problems. *Science*. 1996 ; 273(5277) : 971-3
49. Kraus N, McGee TJ, Koch DB. Speech sound perception and learning : biologic bases. *Scand Audiol Suppl*. 1998 ; 49 : 7-17
50. Nickisch A, Kiese-Himmel C. (Central) Auditory Processing Disorders in 8-10-year-old children : which tests distinguish between normal and impaired children ? *Laryngorhinootologie*. 2009 ; 88(7) : 469-76.
51. Demanez L, Dony-Closon B, Lhonneux-Ledoux F, Demanez JP. Central auditory processing disorders : A French speaking battery *Acta Otorhinolaryngol Belg*. 2003 ; 57(4) : 275-90.