

Deux oreilles valent mieux qu'une

Phonak Insight

L'importance de la diffusion bilatérale entre les aides auditives

La Technologie Binaurale VoiceStream™ permet d'échanger des données sonores en temps réel entre les aides auditives sur l'intégralité de la bande passante. Les aides auditives Phonak sont donc désormais capables de proposer aux utilisateurs des solutions vraiment binaurales dans des situations auditives complexes et exigeantes.

Résumé

Depuis de nombreuses années, les audioprothésistes (par ex. Cherry, 1953) ont compris l'avantage d'entendre des deux oreilles plutôt que d'une seule. En plus d'améliorer la compréhension de la parole dans des environnements calmes, bruyants et réverbérants, l'écoute binaurale, contrairement à l'écoute monaurale, affine la qualité sonore perçue et diminue l'effort que doivent fournir les auditeurs pour entendre la voix qui les intéresse.

Il est important de souligner que le développement récent de la diffusion audio totale entre deux aides auditives est sur le point d'apporter ces avantages aux personnes souffrant d'une perte auditive. Ce document décrit en détail les raisons pour lesquelles la diffusion audio totale entre les aides auditives est bénéfique pour les patients malentendants, en insistant sur l'importance du processus binaural dans les environnements d'écoute difficiles.

Introduction

La perte auditive est une préoccupation importante du domaine de la santé et touche environ 40 % des adultes âgés de plus de 65 ans (Yueh et al., 2003). Lorsqu'elle n'est pas traitée, la perte auditive a de lourdes conséquences dans les domaines psychosocial, émotionnel, physique, cognitif et comportemental de la vie des personnes concernées (Dalton et al., 2003). Les évaluations de l'Organisation Mondiale de la Santé montrent qu'au niveau mondial, la perte auditive est au deuxième rang des causes d'années vécues avec un handicap. Afin de réduire la charge que représente la perte auditive, la méthode de réhabilitation la plus courante consiste à fournir aux personnes concernées des aides auditives et de les conseiller.

Pour la plupart des personnes atteintes d'une perte auditive bilatérale, l'ensemble des preuves recueillies pendant près de trois

décennies de recherche a montré une amélioration considérable pour l'auditeur qui reçoit deux aides auditives plutôt qu'une seule. Bien que les recherches se poursuivent afin de mieux comprendre pourquoi l'écoute des deux oreilles apporte plus d'avantages que d'une seule oreille pour la plupart des auditeurs, on a déjà beaucoup appris. Dans la suite de ce document : quelques informations sur la recherche concernant le problème de l'effet «cocktail party», un bref résumé des avantages principaux de l'écoute binaurale comparée à l'écoute monaurale, puis une description plus détaillée des avantages potentiels découlant d'avancées technologiques importantes dans le développement des aides auditives, à savoir la capacité à diffuser un signal audio sans fil d'une aide auditive à l'autre.

Le problème de l'effet cocktail party

Depuis plus de 50 ans, les chercheurs ont tenté de mieux comprendre comment les auditeurs sont capables d'effectuer des tâches auditives extrêmement complexes dans les situations d'écoute de «cocktail party» (Cherry, 1953). Dans ces situations, un auditeur choisit de suivre et d'identifier la parole d'un locuteur unique parmi toutes les conversations d'arrière-plan dans une situation multi-locuteurs (pour les études, cf. Bregman, 1990; Bronkhorst, 2000). L'identification de la parole en présence de conversations d'arrière-plan est un exercice complexe qui se traduit par un phénomène appelé masquage. Le masquage est un processus par lequel le seuil de détection d'un son (la cible) est rendu plus difficile par la présence d'un autre son (le masqueur). Lors de l'identification de la voix cible en présence de masqueurs,

les difficultés proviennent de deux types de masquage. Alors que le masquage énergétique (French et Steinberg, 1947) se produit lorsqu'une cible et un masqueur se disputent la représentation dans un canal d'information au niveau de la périphérie auditive (par ex. dans un filtre cochléaire ou sur des parties proximales du nerf auditif), le masquage informationnel fait référence au masquage supplémentaire observé lorsque la représentation des signaux concurrents se dispute à un niveau de traitement plus haut ou plus central (Durlach et al., 2003). Le défi de l'écoute dans les environnements où le rapport du signal sur bruit (RSB) est relativement faible pour la cible par rapport aux masqueurs se révèle particulièrement compliqué pour les malentendants et pour de nombreux auditeurs âgés (Pichora-Fuller et Singh, 2006).

Les avantages de l'écoute des deux oreilles plutôt que d'une seule

Afin de surmonter l'effet cocktail party, nous comptons tous, mais surtout les malentendants, beaucoup sur le fait que les humains sont dotés de deux oreilles. Avant de s'interroger sur l'importance de l'écoute des deux oreilles plutôt que d'une seule, passons rapidement en revue quelques avantages liés à l'utilisation d'aides auditives bilatérales. Les avantages des appareillages bilatéraux par rapport aux appareillages unilatéraux: une meilleure compréhension de la parole dans le calme (par ex. Nabelek et Pickett, 1974) et dans les environnements bruyants (par ex. McArdle et al., 2012), une meilleure localisation du son à la fois pour des indices acoustiques de localisation objectifs (par ex. Kobler et Rosenhall, 2002) et subjectifs (par ex. Noble et Gatehouse, 2006), une meilleure qualité sonore (par ex. Balfour et

Hawkins, 1992), une diminution de l'effort nécessaire pour comprendre la parole dans le bruit ambiant (Noble et Gatehouse, 2006), une réduction de la perte d'audition pour l'oreille appareillée par rapport à l'oreille non appareillée (par ex. O'Neil, Connelly, Limb et Ryugo, 2011), une satisfaction accrue des utilisateurs (par ex. Kochkin et Kuk, 1997) et de meilleurs résultats à l'évaluation de l'autoperception de la qualité de vie (par ex. Kochkin, 2000). Au vu des avantages potentiels de l'utilisation de deux aides auditives plutôt qu'une seule, il n'est pas surprenant que, lorsqu'on leur laisse le choix, les malentendants bilatéraux ont une nette préférence pour l'appareillage bilatéral plutôt qu'unilatéral (par ex. Boymans et al., 2008).

Pourquoi est-ce important d'entendre des deux oreilles ?

Les avantages de la disponibilité de deux oreilles proviennent d'un certain nombre d'indices auditifs monauraux et binauraux qui facilitent l'identification de la parole dans le bruit. Ces avantages résultent en particulier de :

1. l'effet «meilleure oreille»
2. la directivité binaurale
3. la sommation binaurale de la sonie
4. la redondance binaurale
5. les comparaisons binaurales

Poursuivons avec une explication plus détaillée de chacun de ces processus.

L'effet « meilleure oreille »

L'indice probablement le plus important que les auditeurs utilisent pour améliorer leur audition dans des environnements bruyants est l'indice monaural résultant de l'effet meilleure oreille (Zurek, 1993). Lorsque les signaux cibles et masqueurs viennent de différents endroits, un avantage RSB en résulte pour une oreille par rapport à l'autre. Cet avantage RSB est acoustique dans la nature car la tête agit comme une barrière acoustique, ce qui crée une différence de niveau entre les deux oreilles (c.-à-d. des effets de diffraction). Par exemple, comparons une situation dans laquelle les signaux cibles et masqueurs se situent à gauche de l'auditeur à une situation dans laquelle la cible est à droite et le masqueur à gauche. Déplacer la cible de la gauche à la droite améliore considérablement le RSB de l'oreille droite, un processus résultant en grande partie du rejet de l'ombre acoustique par la tête de l'auditeur. Par ailleurs, si la cible se situe à gauche et le

masqueur à droite de l'auditeur, le RSB de l'oreille droite obtenu sera plus néfaste et l'auditeur peut profiter du meilleur RSB disponible pour l'oreille gauche. En supposant la séparation spatiale d'une cible et d'un masqueur, l'utilisation de deux oreilles permet à l'auditeur d'allouer des ressources attentionnelles à l'oreille avec le meilleur RSB, quel que soit l'emplacement de la cible ou du masqueur, améliorant ainsi l'identification de la parole dans le bruit (par ex. Hornsby, Ricketts et Johnson, 2006). Avantage supplémentaire: la « décision » de prendre la meilleure oreille en compte est en grande partie un processus réflexe lorsque les auditeurs essaient de comprendre la parole dans des environnements bruyants et/ou réverbérants. Il a été constaté que l'avantage auditif découlant de l'effet meilleure oreille peut atteindre 8 dB (Bronkhorst et Plomp, 1988).

Directivité binaurale

Alors que le son se propage du champ libre au tympan, le torse, la tête et les pavillons provoquent un certain nombre de transformations acoustiques dépendant de la direction qui aident les auditeurs à localiser les objets sonores (Shaw, 1974). S'ils savent où écouter, les auditeurs, jeunes ou plus âgés, bénéficient d'un avantage considérable en portant leur attention vers la cible (par ex. Singh et al., 2008). Historiquement, les études sur les transformations acoustiques relatives au corps ont porté sur les effets acoustiques monauraux. Cependant, des recherches plus récentes ont mis l'accent sur la façon dont le système auditif intègre la

directivité monaurale (par ex. Sivonen, 2011), un processus de plus en plus pertinent pour les développeurs d'aides auditives compte tenu des progrès réalisés avec les algorithmes de traitement du signal binaural. La directivité binaurale est donc l'avantage auditif directionnel résultant de l'écoute des deux oreilles plutôt que d'une seule. La philosophie motivant le développement de modes de traitement du signal de directivité binaurale consiste à exploiter la capacité de l'auditeur à se concentrer sur des ressources attentionnelles le long d'un vecteur spatial.

Sommation binaurale de la sonie

Second avantage majeur de l'écoute des deux oreilles plutôt que d'une: les auditeurs remarquent une perception accrue de la sonie, un phénomène connu sous le nom de sommation binaurale de la sonie (Reynolds et Stevens, 1960). Deux caractéristiques de la sommation binaurale de la sonie la rendent particulièrement intéressante pour les développeurs d'aides auditives. Considérons d'abord l'ampleur de l'augmentation de la perception de la sonie résultant de la sommation binaurale. En général, les évaluations basées sur le seuil de la sommation binaurale de la sonie rapportent une augmentation de la perception de sonie d'environ 3 dB (Keys, 1947). En revanche, la perception de la sonie pour les signaux supraliminaires est plus élevée que pour les signaux liminaires, avec des valeurs comprises entre 6 et 10 dB environ (Haggard et Hall, 1982). Cela nous conduit donc à une première conclusion intéressante concernant la sommation binaurale de la sonie, à savoir qu'il existe un avantage considérable (entre 6 et 10 dB) à l'écoute des deux oreilles plutôt que d'une seule.

Seconde caractéristique de la sommation binaurale de la sonie que les développeurs d'aides auditives trouvent particulièrement intéressante: contrairement à plusieurs phénomènes où les malentendants montrent généralement des capacités beaucoup plus faibles que les normo-entendants (par ex., un démasquage spatial plus faible [Best, Mason et Kidd, 2011], une réduction du bruit binaural moindre [Peissig et Kollmeier, 1997], une sensibilité accrue à transmettre le masquage [Oxenham et Plack, 1997]), les

malentendants affichent des valeurs de sommation binaurale similaires à celles constatées chez les normo-entendants (Hawkins et al., 1987; voir figure 1). Il s'agit là d'un détail important car, comme les aides auditives continuent d'être développées de manière à tirer parti de l'effet de sommation binaurale de la sonie, il laisse à penser que tous les auditeurs peuvent potentiellement en tirer des avantages, quel que soit leur degré de perte auditive.

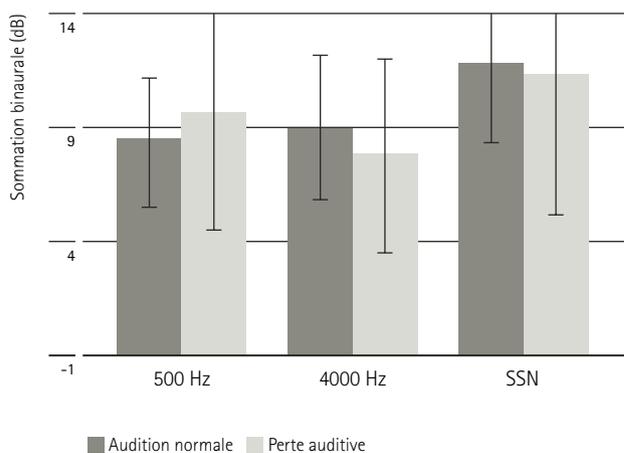


Figure 1
Sommation binaurale moyenne en dB pour des sons purs de 500 Hz et 4 000 Hz et le bruit sur le spectre vocal chez les normo-entendants et les malentendants. Ce chiffre a été généré à partir du tableau 4 «MCL-B» de Hawkins et al. (1987).

Redondance binaurale

Imaginons une situation dans laquelle une personne perd la vision des deux yeux mais, de façon incroyable, la perte est nettement différente pour chaque œil. À l'œil gauche, la personne souffre d'une vision tubulaire extrême et n'a aucune vision périphérique (cas parfois chez les personnes atteintes de rétinite pigmentaire). À l'œil droit, la personne souffre d'une perte totale de la vision centrale sans que la vision périphérique ne soit touchée (cas parfois chez les personnes atteintes de dégénérescence maculaire). La vision serait sévèrement limitée en utilisant un seul œil mais, en théorie, l'usage des deux yeux permettrait de voir presque totalement une scène, puisque les centres cognitifs supérieurs intégreraient les données de chaque œil pour former une image du monde plus unifiée et moins fragmentée. Ce scénario met en évidence l'avantage de la redondance dans le système visuel résultant de la disponibilité des deux yeux. Notons qu'un processus similaire se produit dans le système auditif.

La redondance binaurale est l'avantage apporté par la réception par les deux oreilles d'informations identiques sur le signal (également appelé écoute dichotique). L'un des inconvénients de l'écoute d'une oreille plutôt que deux, c'est que le système auditif ne dispose que d'une seule possibilité pour capturer les informations disponibles dans un signal.

En d'autres termes, il y a perte de redondance des indices disponibles dans les deux oreilles. La redondance binaurale décrit un processus par lequel le cerveau examine deux fois chaque son (Dillon, 2001). Ce processus est particulièrement pertinent chez les auditeurs souffrant d'une perte de l'audition asymétrique puisque les indices auditifs d'un signal donné peuvent être plus rapidement accessibles pour une oreille que pour une autre. Par exemple, considérons une personne souffrant d'une perte dans les aigus de l'oreille gauche et dans les graves de l'oreille droite. En

présentant un signal aux deux oreilles, l'auditeur sera capable d'accéder aux indices aigus et graves avec les oreilles gauche et droite, respectivement.

Le terme redondance binaurale peut souvent être interchangeable avec sommation binaurale, un terme à ne pas confondre avec sommation binaurale de la sonie qui fait référence à l'association

d'informations qui entraîne une meilleure perception de la sonie. On observe en général des améliorations du RSB de 1 à 2 dB dans les expériences sur l'écoute dichotique (par ex. Bronkhorst et Plomp, 1988). À la fois les normo-entendants et les malentendants peuvent profiter de l'effet de redondance binaurale (Day et al., 1988).

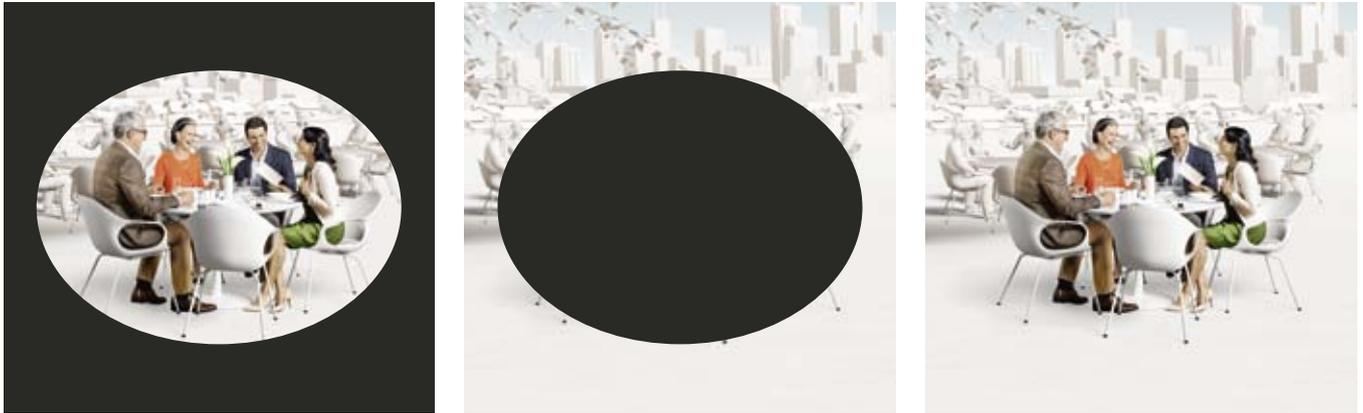


Figure 2
Gauche : Rétinite pigmentaire : vision tubulaire extrême (perte totale de la vision périphérique).
Milieu : Dégénérescence maculaire : aucune vision centrale (vision périphérique non touchée).
Droite : Résultat : accès à la plupart des indices visuels et image mentale induite plus unifiée.

Comparaisons binaurales

L'écoute peut également être améliorée en faisant des comparaisons entre les deux oreilles, car lorsque les sons arrivent d'un point dans l'espace (autre que lorsqu'ils sont émis directement en face ou derrière un auditeur), le son arrivera d'abord à une oreille (d'où le déphasage interaural ou indice ITD) et le son sera plus fort dans l'oreille la plus proche du signal (d'où la différence interaurale de niveau ou indice ILD) (cf. Bronkhorst, 2000). Ces deux indices sont décisifs pour la localisation et leur disponibilité peut faciliter la compréhension de la parole dans des environnements d'écoute complexes lorsque les sons cibles proviennent d'emplacements d'écoute imprévus (Singh, Pichora-Fuller et Schneider, 2008). En plus de fournir des indices ILD et ITD, le traitement binaural des différences interaurales permet aux systèmes perceptifs supérieurs de profiter des différences spectro-temporelles subtiles entre les signaux cibles et masqueurs

arrivant dans chaque oreille grâce à un processus connu sous le nom de corrélation interaurale croisée (ICC) (par ex. Colburn et al., 2006 ; Culling, Hawley et Litovsky, 2004). Par exemple, Akeroyd et Summerfield (2000) ont constaté que dans des situations auditives difficiles avec un RSB faible, les auditeurs tirent profit des comparaisons ajustées de profils spectraux corrélés d'un signal arrivant à une oreille plutôt qu'à l'autre. La contribution des ILD, ITD, et ICC aux performances d'écoute est relativement bien admise dans des environnements d'écoute simples, très contrôlés et anéchoïques. Cependant, il nous reste beaucoup à apprendre sur les avantages de ces indices dans les environnements bruyants, réverbérants et multi-locuteurs car tous s'associent dans une complexité qui ne permet pas encore d'analyse utile avec les méthodes expérimentales actuellement disponibles.

Technologie Binaurale VoiceStream™

Bien que tous les fabricants principaux d'aides auditives aient mis au point des aides auditives capables d'échanger des informations sans fil entre elles, il faut tenir compte de la complexité des capacités de diffusion des données disponibles entre eux. À ce jour, les aides auditives les plus sophistiquées sont capables d'envoyer et de recevoir des informations à un débit d'environ 300 Kbits/seconde. À cette vitesse d'échange, elles peuvent envoyer et recevoir un signal audio sur l'intégralité de la largeur de bande, établissant ainsi une nouvelle frontière qui passionne les développeurs et tout particulièrement les porteurs d'aides auditives. En outre, la possibilité de copier, d'envoyer, de recevoir et de présenter des signaux audio continus entre aides auditives encouragera de nouvelles innovations prenant en considération les décennies de recherche sur le traitement binaural.

Comme indiqué précédemment, dans une situation auditive bruyante et réverbérante, la compréhension de la parole est fortement améliorée en prenant en compte l'oreille avec le meilleur RSB, un phénomène connu sous le nom d'effet meilleure oreille. Un des progrès importants dans le domaine des aides auditives modernes: l'aide auditive est capable de calculer la quantité de signal présent par rapport à la quantité de bruit (le RSB), une capacité qui peut être exercée à une résolution de bandes de fréquences individuelles. Compte tenu de la capacité à diffuser le signal audio complet d'une aide auditive à une autre et parce que chaque aide auditive est capable de calculer le RSB, il est désormais possible de diffuser une copie du signal audio de l'aide auditive avec le meilleur RSB à l'autre aide, offrant ainsi à l'auditeur le résultat de la «meilleure oreille» à non pas une, mais aux deux oreilles.

La capacité de diffusion de l'oreille avec le RSB le plus élevé à l'autre oreille est peut-être mieux illustrée par la fonction DuoPhone (voir figure 3). Lors de l'utilisation d'un téléphone avec des aides auditives traditionnelles, il est évident qu'il existe une oreille avec un RSB relativement bon (l'oreille sur laquelle le téléphone est placé) et une oreille avec un RSB relativement faible (l'autre oreille). En diffusant le signal sans fil de la meilleure oreille pour en présenter une copie à l'autre oreille, l'auditeur disposera d'une meilleure capacité à comprendre la parole à travers le téléphone (Picou et Ricketts, 2011). Bien que cet exemple mette en évidence l'intérêt de l'échange audio en temps réel entre les aides

auditives lors de l'utilisation du téléphone, il est possible d'appliquer cette technologie à toute situation dans laquelle l'aide auditive détecte un RSB meilleur dans une oreille que dans l'autre.

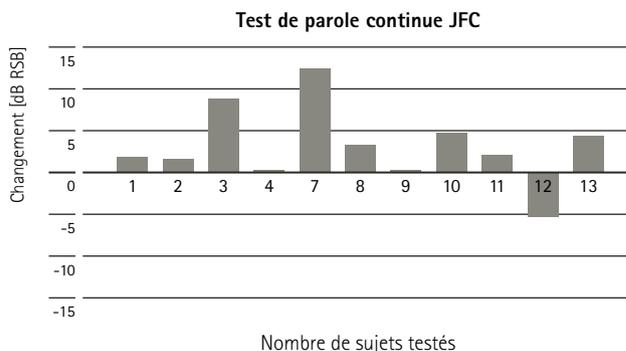


Figure 3

Nyffeler (2010) représente l'utilité du test de parole continue JFC (Just Follow Conversation). Le changement est calculé en soustrayant le niveau de parole requis lors de l'écoute avec DuoPhone à celui requis lors de l'écoute d'un signal monaural (les valeurs positives représentent une amélioration).

La Technologie Binaurale VoiceStream™ présente un avantage important et unique supplémentaire lorsqu'elle est associée à une technologie de microphone directionnel standard. Dans la plupart des aides auditives modernes, le traitement directionnel est réalisé grâce à deux microphones omnidirectionnels se situant dans une seule aide auditive. Cependant, avec l'arrivée de la diffusion audio de l'intégralité de la bande passante entre les aides auditives, il est désormais possible d'obtenir un traitement directionnel qui coordonne les signaux des quatre microphones disponibles avec un appareillage bilatéral, créant ainsi un faisceau directionnel totalement binaural. Nous pouvons donc dès lors envisager d'obtenir des réponses polaires plus avancées du faisceau directionnel, réponses qui n'étaient pas disponibles auparavant avec les systèmes de microphones directionnels qui coordonnent l'entrée de deux microphones. Avec StereoZoom, par exemple, Phonak est maintenant capable de réaliser un diagramme de faisceau plus ciblé par rapport aux faisceaux directionnels classiques, offrant une amélioration considérable de la compréhension de la parole (Kreikemeier et al., 2012).

Pourquoi l'écoute est-elle améliorée avec la diffusion audio totale entre les aides auditives ?

Les capacités d'écoute s'améliorent avec la diffusion audio totale entre les aides auditives en grande partie car les aides auditives sont capables de tirer profit de l'effet meilleure oreille, ce qui revêt une importance toute particulière en raison des avantages supplémentaires que la sommation binaurale de la sonie et la redondance binaurale offrent. Rappelons-nous que l'effet meilleure oreille est certainement la raison la plus importante pour laquelle la compréhension s'améliore dans des environnements d'écoute difficiles lorsque les signaux cibles et masqueurs proviennent de différents endroits (Brungart et Simpson, 2002). En copiant le signal audio de l'aide auditive située sur la meilleure oreille et le présentant également à l'aide auditive avec le RSB le plus faible, les auditeurs font l'expérience d'une situation auditive plus favorable. Plus précisément, le signal disponible à la «meilleure oreille» est traité et acheminé, pas seulement par l'aide auditive située sur la «meilleure oreille», mais par les deux aides auditives.

L'avantage de la diffusion audio totale entre les aides auditives ne se limite pas à l'utilisation stratégique de l'effet meilleure oreille. De plus, la diffusion sans fil du signal audio complet tire profit à la fois de la sommation binaurale de la sonie et de l'effet de redondance binaurale. Comme il a déjà été dit, la sommation binaurale offre aux auditeurs un avantage d'écoute non négligeable

de 6 à 10 dB et, surtout, la possibilité de profiter de la sommation binaurale de la sonie semble être totalement préservée pour les auditeurs souffrant d'une perte auditive neuro-sensorielle. Enfin, en présentant un signal aux deux oreilles, on offre au système auditif de multiples possibilités, plutôt qu'une seule, d'atteindre des indices sonores disponibles dans le signal (par ex., la redondance binaurale). Comme indiqué plus tôt, la redondance binaurale se traduit en général par des améliorations du RSB de 1 à 2 dB qui pourraient être plus importantes chez les personnes souffrant d'une perte de l'audition asymétrique.

Pour finir, rappelons que lorsque le son se propage du champ libre au tympan, le corps humain produit un certain nombre de transformations acoustiques dépendant de la direction qui représentent d'importants indices de localisation pour les auditeurs. En particulier, les indices disponibles pour chaque oreille s'associent; un processus qui entraîne la directivité binaurale ou l'avantage auditif directionnel lors de l'écoute des deux oreilles plutôt que d'une seule. StereoZoom et autoStereoZoom sont conçus pour imiter la directivité binaurale chez les malentendants bilatéraux via la coordination des deux systèmes à double microphone disponibles avec des appareils bilatéraux, une capacité que permet uniquement la Technologie Binaurale VoiceStream™.

Conclusions

- La Technologie Binaurale VoiceStream™ permet d'échanger sans fil des signaux audio sur l'intégralité de la bande passante entre les aides auditives. Elle représente une importante avancée technologique dans le développement d'aides auditives et ouvre la possibilité d'exploiter des décennies de recherche sur le traitement binaural.
- Il est possible d'appliquer la technologie de diffusion audio totale dans une situation auditive où l'aide auditive détecte un meilleur RSB sur une bande de fréquence d'une des deux aides auditives.
- La Technologie Binaurale VoiceStream™ se sert de plusieurs mécanismes essentiels pour améliorer la compréhension dans des environnements d'écoute difficiles. Parmi ces mécanismes: l'effet meilleure oreille, l'effet de sommation binaurale de la sonie et l'effet de redondance binaurale.
- La Technologie Binaurale VoiceStream™, associée à une technologie de microphone directionnel, active StereoZoom et autoStereoZoom, des fonctionnalités qui utilisent les avantages de l'écoute découlant de la directivité binaurale.

Bibliographie

- Akeroyd M.A. & Summerfield A.Q. (2000).** Integration of monaural and binaural evidence of vowel formants. *Journal of the Acoustical Society of America*, 107(6), 3394–3406.
- Balfour P.B. & Hawkins D.B. (1992).** A comparison of sound quality judgments for monaural and binaural hearing aid processed stimuli. *Ear and Hearing*, 13(5), 331–339.
- Best V., Mason C.R. and Kidd G. (2011).** Spatial release from masking in normally hearing and hearing-impaired listeners as a function of the temporal overlap of competing talkers. *Journal of the Acoustical Society of America* 129(3), 1616–1625.
- Boymans M., Goverts S.T., Kramer S.E., Festen J.M. & Dreschler W.A. (2008).** A prospective multi-centre study of the benefits of bilateral hearing aids. *Ear and Hearing*, 29(6), 930–941.
- Bregman A.S. (1990).** *Auditory Scene Analysis*. MIT Press: Cambridge, MA.
- Bronkhorst A.W. (2000).** The cocktail party phenomenon: A review of research on speech intelligibility in multiple talker conditions. *Acustica*, 86, 117–128.
- Bronkhorst A.W. & Plomp R. (1988).** The effect of head-induced interaural time and level differences on speech intelligibility in noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 83, 1508–1516.
- Brungart D. & Simpson B. (2002).** The effects of spatial separation in distance on the informational and energetic masking of a nearby speech signal. *Journal of the Acoustical Society of America* 112, 664–676.
- Cherry E.C. (1953).** Some experiments on the recognition of speech, with one and two ears. *Journal of the Acoustical Society of America*, 25, 975–979.
- Colburn H.S., Shinn-Cunningham B., Kidd G. Jr. & Durlach N. (2006).** The perceptual consequences of binaural hearing. *International Journal of Audiology*, 45(Suppl 1), S34–44.
- Culling J.F., Hawley M.L. & Litovsky R.Y. (2004).** The role of head-induced interaural time and level differences in the speech reception threshold for multiple interfering sound sources. *Journal of the Acoustical Society of America*, 116, 1057–1065.
- Dalton D.S., Cruickshanks K.J., Klein B.E.K, Klein R., Wiley T.L., et al. (2003).** The impact of hearing loss on quality of life in older adults. *The Gerontologist*, 43(5), 661–668.
- Day G., Browning G. & Gatehouse S. (1988).** Benefit from binaural hearing aids in individuals with a severe hearing impairment. *British Journal of Audiology*, 23, 273–277.
- Dillon A. (2001).** Beyond usability: process, outcome and affect in human-computer interactions. *Canadian Journal of Library and Information Science*, 26(4), 57–69.
- Duquesnoy A.J. (1983).** The intelligibility of sentences in quiet and in noise in aged listeners. *Journal of the Acoustical Society of America*, 74, 1136–1144.
- Durlach N.I., Mason C.R., Kidd G. Jr., Arbogast T.L., Colburn H.S. & Shinn-Cunningham B.G. (2003).** Note on informational masking. *Journal of the Acoustical Society of America*, 113, 2984–2987.
- French N.R. & Steinberg J.C. (1947).** Factors governing the intelligibility of speech sounds. *Journal of the Acoustical Society of America*, 19, 90–119.
- Haggard M. & Hall J. (1982).** Forms of binaural summation and the implications of individual variability for binaural hearing aids. *Scandinavian Audiology Supplementum* (15), 47–63.
- Hawkins D.B., Walden B.E., Montgomery A. & Prosek R.A. (1987).** Description and validation of an LDL procedure designed to select SSPL90. *Ear and Hearing*, 8(3), 162–169.
- Hornsby B.W., Ricketts T. A. & Johnson E. E. (2006).** The effects of speech and speechlike maskers on unaided and aided speech recognition in persons with hearing loss. *Journal of the American Academy of Audiology*, 17, 432–447.
- Keys J.W. (1947).** Binaural versus monaural hearing. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 19(4), 629–631.
- Kobler S. & Rosenhall U. (2002).** Horizontal localization and speech intelligibility with bilateral and unilateral hearing aid amplification. *International Journal of Audiology*, 41, 395–400.
- Kochkin S. & Kuk F. (1997).** The binaural advantage: evidence from subjective benefits and customer satisfaction data. *The Hearing Review*, 4(4), 29–32.
- Kochkin S. (2000).** MarkeTrak V: Consumer Satisfaction Revisited. *The Hearing Journal*, 53(1), 38–55.
- Kreikemeier S., Margolf-Hackl S., Raether J., Fichtl E. & Kiessling J. (2012).** Vergleichende Evaluation unterschiedlicher Hörgeräte-Richtmikrofontechnologien bei hochgradig Schwerhörigen. *Zeitschrift für Audiologie, Supplement zur 15. Jahrestagung der deutschen Gesellschaft für Audiologie*.
- McArdle R., Killion M., Mennite M. & Chisolm T. (2012).** Are two ears not better than one? *Journal of the American Academy of Audiology*, 23, 171–181.
- Nabelek A.K. & Pickett J.M. (1974).** Reception of consonants in a classroom as affected by monaural and binaural listening, noise, reverberation, and hearing aids. *Journal of the Acoustical Society of America*, 56, 628–639.
- Noble W. & Gatehouse S. (2006).** Effects of bilateral versus unilateral hearing aid fitting on abilities measured by the Speech, Spatial, and Qualities of Hearing Scale (SSQ). *International Journal of Audiology*, 45, 172–181.
- Nyffeler M. (2010).** DuoPhone. *Field Study News*, February.
- O’Neil J.N., Connolly C.J., Limb C.J. & Ryugo D.K. (2011).** Synaptic morphology and the influence of auditory experience. *Hearing Research*, 279(102), 118–130.
- Oxenham A.J. & Plack C.J. (1997).** A behavioral measure of basilar membrane nonlinearity in listeners with normal and impaired hearing. *Journal of the Acoustical Society of America*, 101, 3666–3675.
- Peissig J. & Kollmeier B. (1997).** Directivity of binaural noise reduction in spatial multiple noise-source arrangements for normal and impaired listeners. *Journal of the Acoustical Society of America*, 101, 1660–1670.
- Pichora-Fuller M.K. & Singh G. (2006).** Effects of age on auditory and cognitive processing: implications for hearing aid fitting and audiological rehabilitation. *Trends in Amplification*, 10, 29–59.
- Picou E.M. & Ricketts T.A. (2011).** Comparison of wireless and acoustic hearing aid-based telephone listening strategies. *Ear and Hearing*, 32(2), 209–220.
- Reynolds G.S. & Stevens S.S. (1960).** Binaural summation of loudness. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 32(10), 1337–1344.
- Singh G., Pichora-Fuller M.K. & Schneider B.A. (2008).** The effect of age on auditory spatial attention in conditions of real and simulated spatial separation. *Journal of the Acoustical Society of America*, 124, 1294–1305.
- Sivonen V.P. (2011).** Binaural directivity patterns for normal and aided human hearing. *Ear & Hearing*, 32, 674–677.
- Shaw E.A.G. (1974).** Transformation of sound pressure level from the free field to the eardrum in the horizontal plane. *Journal of the Acoustical Society of America*, 56, 1848–1860.
- Yueh B., Shapiro N., MacLean C.H., et al. (2003, April 16).** Screening and management of adult hearing loss in primary care. *Journal of the American Medical Association*, 289 (15), 1976–1985.
- Zurek P. M. (1980).** The precedence effect and its possible role in the avoidance of interaural ambiguities. *Journal of the Acoustical Society of America*, 67, 953–964.