

AVANTAGES D'UN SYSTEME DE MULTI-MICROPHONE ADAPTATIF

Volker Kühnel,
Ph.D. et Paul C.
Checkley, M.Sc.

Phonak AG,
Stäfa, Suisse

On reconnaît largement qu'entendre dans le bruit est l'un des problèmes principaux auxquels sont confrontés les malentendants atteints de pertes auditives de perception. Un défi majeur a donc été de pouvoir appliquer des technologies capables d'augmenter le niveau du signal utile tout en atténuant le bruit environnant. Pour cela, il faut améliorer le rapport du signal au bruit (S/B) et la méthode la plus efficace à ce jour est d'utiliser la technique du multi-microphone. Un nouveau système, appelé AudioZoom numérique adaptatif (dAZ), est représentatif de l'application efficace du traitement numérique pour améliorer vraiment la technologie directionnelle. Ce système unique supprime le bruit dans l'espace arrière ($\pm 90^\circ$), quel que soit l'angle d'incidence, et n'exige aucune commutation manuelle par l'utilisateur. En fait, le dAZ cherche continuellement la source de bruit dominante dans un environnement sonore et peut supprimer le bruit dans sa direction. Méthode: Les valeurs de S/B pour un niveau de performance donné dans le bruit ont été mesurées avec des appareils Claro 211 dAZ réglés en modes microphoniques omnidirectionnel, directionnel fixe (cardioïde) et AudioZoom numérique adaptatif. Ces trois réglages ont été testés avec des sources de bruit arrières (180°) et latérales ($\pm 90^\circ$) par rapport aux sujets. Un groupe de référence bien entendant non appareillé a également été testé dans les mêmes conditions de bruit. Résultats: Une amélioration significative par rapport au mode omnidirectionnel a été mise en évidence avec les deux configurations de multi-microphone, dans les deux conditions de bruit. Toutefois, l'amélioration obtenue avec l'AudioZoom numérique adaptatif était significativement plus importante que celle du mode fixe quand la source de bruit était latérale. De plus, les sujets malentendants appareillés avec le dAZ atteignaient des niveaux de performances similaires à ceux du groupe de bien entendants. Conclusion: L'AudioZoom numérique adaptatif révèle des avantages significatifs par rapport à un système fixe quand le bruit est latéral et offre de réels bénéfices dans le bruit aux utilisateurs d'aides auditives.

It is widely accepted that hearing in noise is one of the main problem areas faced by those with sensorineural hearing impairment. A central challenge therefore has been to apply technologies which can increase the level of the signal of interest while attenuating background noise. In order to achieve this, it is necessary to improve the Signal-to-Noise Ratio (SNR) and the most successful method to date is the use of multi-microphone technology. A new system called Adaptive digital AudioZoom (dAZ) represents the effective use of digital processing to make real improvements in directional technology. This unique system suppresses noise in the rear plane ($\pm 90^\circ$), regardless of the angle of incidence, and does not require manual switching by the user. In effect dAZ continually searches for the dominant noise source in an environment and is able to suppress noise in that direction. Method: SNR values for a given level of performance in noise were measured with omnidirectional, fixed (cardioid) and Adaptive digital AudioZoom microphone settings on Claro 211 dAZ instruments. All three settings were tested with noise sources behind (180°) and either side ($\pm 90^\circ$) of the subjects. An unaided normal hearing reference group was also tested in the same noise conditions. Results: Both multi-microphone configurations showed a significant improvement over the omnidirectional mode in both noise conditions. However, Adaptive digital AudioZoom demonstrated a significant improvement over the fixed mode when the noise source was to the side. In addition hearing impaired subjects using dAZ showed similar levels of performance to the normal hearing group. Conclusion: Adaptive digital AudioZoom shows significant advantages over a fixed system when noise is to the sides and offers real benefits in noise to hearing instrument users.

Paul Checkley, M.Sc.
Service de communication audiolinguistique et d'éducation de Phonak SA, Suisse

Paul Checkley est spécialiste en audiologie et a acquis une expérience clinique à la fois diagnostique et corrective. Il a aussi enseigné à l'institut d'otologie et de laryngologie de Londres. Il a passé son premier diplôme universitaire en 1985 dans le domaine de la physique médicale et a obtenu sa maîtrise d'audiologie au collège universitaire de Londres en 1993. Sa plus récente expérience a été celle de scientifique clinique à l'hôpital royal d'oto-rhino-laryngologie de Londres où il était responsable de la technologie des aides auditives et de la recherche clinique. Il a rejoint le service de communication audiolinguistique et d'éducation de Phonak, en Suisse, en 1999.





Volker Kühnel, Ph.D.
Service de recherche et développement de Phonak SA, Suisse

Volker Kühnel a obtenu son diplôme de physique en 1991 à l'université de Göttingen, en Allemagne. Il obtint son doctorat à Göttingen en 1995. De 1991 à 1995, il a travaillé comme assistant de recherche à l'université de Göttingen et a occupé une position postdoctorale à l'université d'Oldenburg, dans l'équipe de physique médicale du professeur B. Kollmeier. Dans ce service, il était responsable du développement des nouvelles méthodes de mesures audiolinguistiques. Il a rejoint Phonak en 1998 et travaille actuellement dans la recherche et le développement où il est responsable des projets de recherche audiolinguistique, des nouveaux concepts d'appareillage et des essais cliniques pour la recherche.

1 INTRODUCTION

On admet largement qu'entendre dans le bruit est l'un des principaux défis auxquels sont confrontés les malentendants atteints de pertes auditives neurosensorielles^{1,4} et l'on a montré que les difficultés dans le bruit s'aggravent avec l'importance de la perte.⁵ On sait aussi que, actuellement, le moyen le plus efficace pour améliorer la reconnaissance vocale dans le bruit est d'augmenter le rapport du signal au bruit (S/B).⁶⁻⁹

Un défi essentiel pour les fabricants d'aides auditives a donc été de mettre en œuvre des technologies capables d'augmenter le niveau du signal utile tout en atténuant le bruit ambiant. Pour y parvenir, de nombreuses approches ont été appliquées dans le passé (ex., suppression des graves et contrôle automatique de la réponse en fréquence).

La meilleure méthode à l'heure actuelle pour améliorer le S/B est l'emploi de microphones directionnels et de la technique des multi-microphones.¹⁰⁻¹² Le succès de ces systèmes résulte du fait que l'on interdit aux bruits émis derrière l'utilisateur de pénétrer dans l'appareil; celui-ci reçoit donc un signal beaucoup plus "propre" pour la suite du traitement. D'autres méthodes de réduction du bruit utilisent un traitement du signal pour renforcer la

parole ou réduire le niveau du bruit après que l'ensemble ait pénétré dans le circuit de traitement.

2 APPLICATION DE LA DIRECTIVITE DANS LES AIDES AUDITIVES

A. Microphones directionnels

Les aides auditives à microphones directionnels sont disponibles sur le marché depuis le début des années 70. Bien que les premiers produits n'aient pas vraiment réussi à s'imposer¹³, de nombreuses études, au début des années 80, ont montré que ces systèmes étaient très efficaces.¹⁴⁻¹⁶ Les courbes de directivité de ces microphones directionnels classiques avaient une configuration cardioïde (atténuation maximale pour les sons arrière, à 180° d'azimut) qui offrait jusqu'à 3 à 4 dB d'amélioration du S/B dans un milieu d'essai non réverbérant.^{16,17} Malgré les avantages de S/B associés à ces premiers microphones directionnels, quelques inconvénients pratiques se sont révélés en

ce qui concerne leur emploi dans les situations auditives de la vie quotidienne: le plus important, c'est qu'ils n'offraient pas la possibilité de choisir un mode omnidirectionnel, quand celui-ci était nécessaire dans certaines situations (ex.: dans la rue ou pour écouter de la musique).

B. Technique des multi-microphones

Un progrès important a été accompli dans la technologie des microphones directionnels avec l'introduction des réseaux de microphones multiples. Cette technologie utilise deux microphones omnidirectionnels distincts, parfaitement appariés, conçus pour permettre à l'utilisateur de commuter électroniquement entre différents programmes associés à un mode microphonique soit omnidirectionnel, soit directionnel. L'efficacité de la technique des multi-microphones a fait l'objet de nombreuses publications qui ont montré des améliorations significatives du S/B et un haut niveau de satisfaction des utilisateurs.^{6,18-26}

Bien que la technique du multi-microphone ait aidé à surmonter beaucoup des inconvénients des microphones directionnels classiques, ces réseaux microphoniques ont toujours une direction fixe d'atténuation maximale du bruit (ex.: ±90°, bidirectionnel ou 180°, cardioïde).

Le diagramme de la figure 1 montre les courbes polaires d'un appareil à

multi-microphones, relevées à 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz et 4000 Hz. La zone d'atténuation maximale dans cet exemple est située à l'arrière, à une direction fixe d'environ 180°. Dans la vie quotidienne, cependant, les interférences bruyantes peuvent provenir de n'importe quelle direction et le pôle de la courbe de directivité peut donc ne pas toujours correspondre avec l'angle d'incidence du bruit.



Figure 1 : Courbe polaire d'un appareil à microphones multiples à différentes fréquences. On observe une zone d'atténuation maximale qui, dans ce cas, est essentiellement située à l'arrière de l'utilisateur.

C. Appareils numériques

Ayant reconnu les limites d'une courbe polaire fixe unique, on a proposé quelques systèmes multi-microphoniques numériques qui offrent la possibilité de commuter entre différentes courbes polaires fixes. Ceci exige de l'utilisateur qu'il détermine la direction de la source de bruit dominante dans un environnement donné et sélectionne manuellement la courbe appropriée pour obtenir la suppression maximale du bruit, ce qui peut ne pas être très pratique, voir difficile, pour certains sujets et/ou situations.

Un certain nombre d'études montrent que le traitement du signal seul n'est pas suffisant pour améliorer de façon

significative la compréhension de la parole dans le bruit.²⁷⁻²⁹ De plus, d'autres études indiquent que les aides auditives numériques dotées des technologies directionnelles ou multi-microphoniques n'ont révélé, jusqu'à présent, aucun avantage significatif dans le bruit par rapport aux appareils analogiques à microphones multiples.^{11,30} Le défi a donc été de pouvoir numériser la technique des multi-microphones pour qu'elle offre à ses utilisateurs de plus grands avantages dans les situations bruyantes.

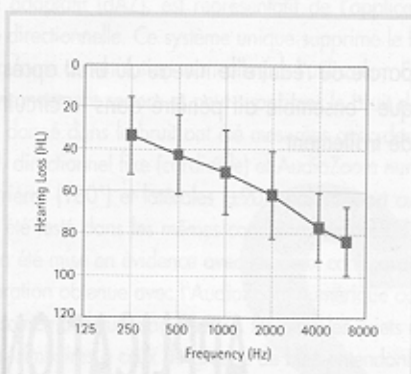


Figure 2 : Moyenne des audiogrammes des oreilles droites et gauches de l'ensemble des sujets.

3 UN SYSTEME DE MICROPHONES À TRAITEMENT NUMÉRIQUE ADAPTATIF DU SIGNAL

Une application originale de la technologie numérique, appelée AudioZoom numérique adaptatif (dAZ), a été incorporée dans de nouveaux systèmes auditifs (Claro de Phonak) pour améliorer l'efficacité de la suppression du bruit perturbant, indépendamment de son angle d'incidence. Ceci est obtenu en adaptant automatiquement la courbe de directivité en fonction

de l'environnement, de telle sorte que la zone de sensibilité minimale (c.-à-d. le "0" de la courbe) soit toujours orientée en direction de la source de bruit dominante, derrière le sujet ($\pm 90^\circ$).

Le principe de ce système numérique de multi-microphones est d'associer la sortie en temps réel d'un des microphones avec la sortie retardée du second pour réaliser une caractéristique directionnelle. Les signaux de sortie analogiques de chacun des deux microphones omnidirectionnels, séparés dans l'espace, sont convertis en des signaux numériques à l'aide de deux convertisseurs analogiques / numériques distincts. Les signaux numériques pénètrent alors dans le processeur spatial où ils sont combinés pour produire la courbe de directivité qui convient à un environnement donné.

Cette courbe polaire évolue constamment pour assurer que le niveau de sortie du système reste minimum; c'est ce processus continu qui est caractéristique de la nature adaptative du réseau et qui garantit la réduction du niveau de bruit. La minimisation de la sortie est réalisée en admettant que les signaux utiles sont issus de l'avant et que les bruits proviennent de l'arrière de l'utilisateur, dans un arc de $+90^\circ$ à -90° . En fait, le dAZ recherche continuellement le point de l'espace d'où provient le bruit qui doit être le plus atténué et place la zone de sensibilité minimale dans cette direction, de telle sorte qu'une réduction optimale du bruit soit atteinte et maintenue. Dans le cas d'un champ diffus, où les bruits proviennent de multiples directions, le circuit adopte une caractéristique hypercardioïde car c'est celle qui est la plus efficace dans ces conditions.

A. Etude clinique Sujets et méthode

Pour tester l'efficacité du dAZ en laboratoire, on a utilisé un test de phrases dans le bruit permettant de mesurer le S/B requis pour que les sujets atteignent un score de 50% de réponses correctes, le bruit étant présenté soit directement

derrière (180°), soit sur les côtés des sujets ($\pm 90^\circ$). On a comparé les modes omnidirectionnels, directionnels fixes (cardioïde) et multi-microphoniques adaptatifs, tous réalisables avec l'appareil Claro 211 dAZ. En plus des utilisateurs d'aides auditives, des sujets bien entendants non appareillés ont été testés dans les mêmes conditions afin de fournir un groupe de référence.

L'étude a été réalisée en Suisse, à l'hôpital universitaire de Zurich, avec 22 malentendants et 6 sujets bien entendants. Tous les sujets malentendants étaient atteints de pertes de perception légères à moyennes et utilisaient déjà des aides auditives. La perte auditive liminaire moyenne du groupe de malentendants, définie comme étant la moyenne des seuils à trois fréquences (0,5 kHz, 1 kHz et 2 kHz) était de 48 dB HL \pm 16 dB (1 écart-type, min.: 13 dB HL, max.: 93 dB HL). La figure 2 montre l'audiogramme moyen pour les oreilles gauches et droites des 22 sujets malentendants (44 oreilles).

Les appareils étaient adaptés en stéréophonie avec des embouts totalement obturants, afin d'éviter les effets de l'évent ou du larsen sur la courbe de réponse directionnelle et assurer ainsi l'homogénéité du groupe. Les mesures ont été faites dans une pièce acoustiquement traitée dont le bruit résiduel était inférieur à 30 dBA. Le stimulus de test était de la parole dont on réglait le niveau de présentation et l'on a choisi comme matériel vocal pour cette expérience le test de phrase de Göttinger.³¹ Ce test de phrases allemand est très homogène et comprend 20 listes parfaitement équilibrées de 10 courtes phrases chacune. La parole était diffusée par un haut-parleur placé à 0° d'azimut à une distance de 1,1 mètre du sujet. Le bruit, d'un niveau fixe de 70 dB SPL pour les deux conditions de test, était diffusé par des haut-parleurs situés à 180° et $\pm 90^\circ$, également à une distance de 1,1 mètre. Le signal bruyant était de la parole simulante du bruit, créé en superposant numériquement les mots monosyllabiques d'un test de rimes lus par le même orateur.³¹ Les spectres à long terme du bruit et des phrases étaient donc

similaires. Le niveau de la parole était réglé jusqu'à ce que les sujets atteignent un score de 50% de réponses correctes.

Les appareils ont été adaptés à la perte auditive individuelle selon la procédure d'appareillage du fabricant, et l'acceptation initiale de l'utilisateur a également été vérifiée selon ses recommandations avant de commencer les tests. L'ordre de présentation des tests était contrebalancé

en fonction des modes microphoniques, et les modes suivants ont été comparés pour les deux conditions de bruit ($\pm 90^\circ$ et 180°):

- Programme 1 + omni
- Programme 1 + digital AudioZoom (courbe directionnelle fixe - cardioïde)
- Programme 1 + AudioZoom numérique adaptatif.

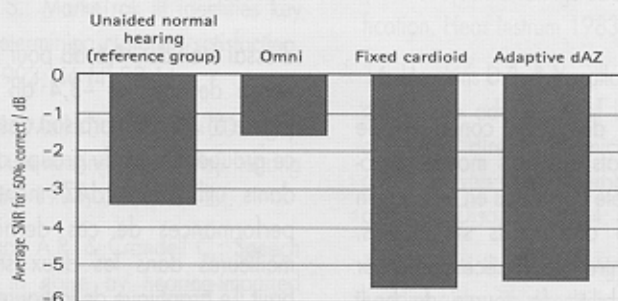


Figure 3 : S/B moyens pour 50% de réponses correctes avec une source de bruit placée à 180° . Une colonne plus négative indique de meilleurs résultats.

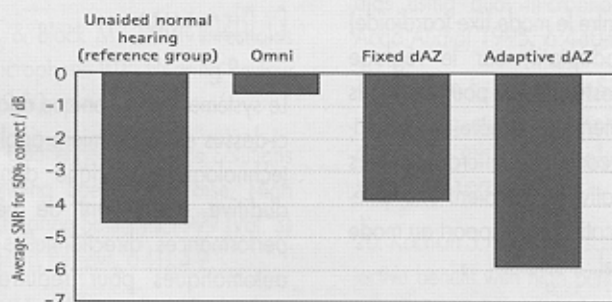


Figure 4 : S/B moyens pour 50% de réponses correctes avec une source de bruit placée à $\pm 90^\circ$. Une colonne plus négative indique de meilleurs résultats.

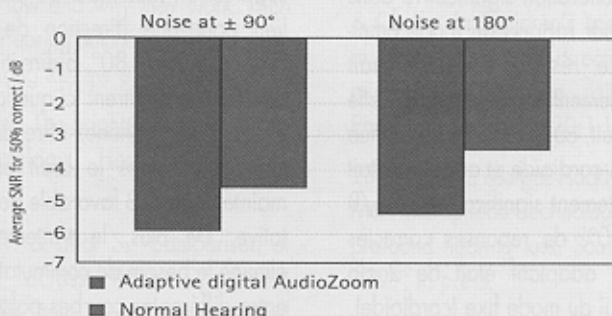


Figure 5 : S/B moyens pour les auditeurs bien entendants (colonnes noires) et malentendants appareillés avec l'AudioZoom numérique adaptatif. Une colonne plus négative indique de meilleurs résultats.

Tous les appareils ont été programmés selon l'algorithme du fabricant qui est optimisé pour l'audition dans le calme (QuietAdapt, Programme 1). Cet algorithme est caractérisé par des constantes de temps rapides (temps d'attaque 5 à 10 ms, temps de retour 90 à 100 ms, selon l'intensité et la fréquence du signal) et un seuil de compression faible, variable en fonction de la fréquence dans chacune des 20 bandes critiques.

B. Résultats

Dans chacune des deux conditions de bruit, les résultats des trois modes microphoniques ont été comparés en utilisant un test t apparié des écarts significatifs. La figure 3 montre le S/B nécessaire pour 50% d'intelligibilité, la source de bruit étant à 180°. En mode omnidirectionnel, le S/B moyen pour 50% de réponses correctes était de -1,6 dB. Comme on pouvait s'y attendre, il y avait peu d'écarts significatifs quand une source de bruit est située à 180° entre le mode fixe (cardioïde) et le mode adaptatif, car le réglage cardioïde fixe est optimisé pour les bruits venant directement de l'arrière de l'utilisateur. Les deux conditions microphoniques (fixes et adaptatives) révélaient une amélioration significative par rapport au mode omnidirectionnel.

Le graphique de la figure 4 indique les résultats obtenus avec une source de bruit placée à $\pm 90^\circ$. Bien que le réglage directionnel fixe soit optimisé pour une suppression maximale à l'arrière (180°), il révélait encore une amélioration significative dans cette situation par rapport au mode omnidirectionnel. Le réseau adaptatif était cependant nettement meilleur dans cette condition de bruit, où la différence obtenue entre les modes cardioïde et adaptatif était également hautement significative. Le S/B moyen pour 50% de réponses correctes dans le mode adaptatif était de 2 dB supérieur à celui du mode fixe (cardioïde).

Le S/B moyen pour 50% de réponses correctes données par les sujets normo-entendants dans les mêmes conditions





	Bidirectional	Hypercardioid	Supercardioid	Cardioid
				
Front to Back Ratio	0 dB	6 dB	11.4 dB	infinite
Directivity Index	4.8 dB	6 dB	5.7 dB	4.8 dB
θ_{max} the angle of max. suppression	90°	110°	125°	180°

Figure 6 : Quatre courbes polaires possibles avec le dAZ. L'indice de directivité est défini comme étant le rapport entre la puissance de sortie du signal utile issu de l'avant et la puissance totale moyenne des bruits issus de toutes les directions.

d'essai était de -4,6 dB pour $\pm 90^\circ$ d'incidence de bruit et -3,4 dB pour 180° (figure 5). La comparaison des résultats de ce groupe à ceux du groupe de malentendants utilisant le dAZ montre que les performances de ces derniers étaient meilleures dans les deux situations de bruit. Le graphique de la figure 5 compare les S/B moyens pour le groupe de sujets bien entendants non appareillés et le groupe de malentendants utilisant le dAZ.

C. Discussion

Le système microphonique adaptatif discuté ci-dessus est la première application de la technologie numérique dans une aide auditive, permettant de bénéficier de performances directionnelles adaptatives automatiques pour réduire le niveau de bruit ambiant, quel que soit son angle d'incidence. Ceci surmonte les limites inhérentes aux appareils à microphones directionnels conventionnels ou à multi-microphones fixes, dans lesquels la suppression maximale du bruit a toujours lieu pour une direction de source fixe (ex.: cardioïde 180°, bidirectionnel $\pm 90^\circ$). Les résultats montrent ici que la technologie des multi-microphones offre des avantages significatifs dans le bruit et permet de maintenir un S/B favorable de façon adaptative. De plus, le traitement adaptatif élimine le besoin de commutation manuelle entre différentes courbes polaires.

Dans cette expérience, nous n'avons testé que deux conditions extrêmes de bruit ($\pm 90^\circ$ et 180°). Il est important de se

souvenir, cependant, que le système est capable de s'adapter pour que l'atténuation du bruit soit maximale quel que soit son angle d'incidence. Les diagrammes de la figure 6 illustrent quatre courbes polaires du système dAZ, parmi une infinité de possibilités. Du fait de la nature adaptative de ce réseau, toute configuration comprise entre le mode bidirectionnel et la cardioïde pourra être mise en œuvre pour atténuer le bruit. En d'autres termes, la source de bruit peut être visée automatiquement quelle que soit son origine et sans les restrictions imposées par une seule, ou un nombre limité de courbes polaires fixes.

Si l'on compare les scores du groupe de référence des bien entendants non appareillés à ceux des sujets appareillés utilisant le mode omnidirectionnel, on observe que les premiers obtiennent des résultats significativement meilleurs. Ceci souligne la nécessité d'améliorer le S/B pour les malentendants⁶⁻⁹ et de ne pas se limiter à amplifier les signaux au-dessus du seuil auditif à l'aide d'appareils omnidirectionnels.

Cependant, la comparaison des résultats obtenus par le groupe de malentendants utilisant leurs microphones en mode dAZ avec ceux des bien entendants, joue en faveur des malentendants. Pour 82% d'entre eux utilisant le dAZ, les S/B requis individuellement pour 50% de reconnaissance correcte des phrases sont égaux ou supérieurs aux valeurs moyennes du groupe de bien entendants, relevées dans les différentes conditions de bruits (-4 dB S/B pour 50% de réponses correctes).

4

BIBLIOGRAPHIE

Lurquin et Rafay¹⁹ n'avaient pas trouvé de différence significative entre un groupe de bien entendants et un groupe d'auditeurs malentendants utilisant des appareils à multi-microphones; mais ils avaient trouvé une différence significative entre les deux groupes quand le multi-microphone n'était pas en service. Pumford et al²⁶ ont comparé les scores obtenus avec des multi-microphones à ceux de 10 sujets bien entendants. Avec des appareils CdO (double microphone + algorithme de bruit), le groupe de malentendants dans sa totalité a atteint de meilleures performances. Soixante-trois pour-cent d'entre eux ont réalisé des scores qui s'inscrivaient dans un intervalle de confiance de 95% des performances normales. Les résultats de ces deux études^{19,26} ont montré que la technique directionnelle conventionnelle permettait déjà d'atteindre des scores d'intelligibilité vocale de l'ordre de grandeur de ceux des biens entendants.

Les résultats de laboratoire avec le dAZ ont montré comment il est désormais pensable que les utilisateurs d'aides auditives bénéficient de conditions plus favorables que les bien entendants dans des environnements pollués par un bruit ambiant, où, par nature, la communication a toujours été difficile voire parfois impossible.

D. Résumé

La technologie directionnelle a beaucoup évolué au cours des années et a toujours suscité un haut niveau d'intérêt pour la recherche, en raison des avantages mesurables qu'elle offre dans le bruit. L'AudioZoom numérique adaptatif est conçu pour fournir la plus grande atténuation du bruit, quel que soit l'angle d'incidence de la source, et surmonter les limitations des microphones directionnels conventionnels ou des multi-microphones directionnels fixes. Les données recueillies dans cette étude ont montré que le dAZ est efficace dans toute une variété de situations dynamiques bruyantes et qu'il est capable d'offrir des avantages significatifs aux utilisateurs d'aides auditives. ■

1. Plomp R.: Auditory handicap of hearing impairment and the limited benefit of hearing aids. *Jour Acoust Soc Amer* 1978; 63:533-49.
2. Kochkin S.: MarkeTrak III identifies key factors in determining customer satisfaction. *Hear Jour* 1993; 46 (4):39-44.
3. Kochkin S.: MarkeTrak III: Why 20 million in U.S. don't use hearing aids for their hearing loss. *Hear Jour* 1994; 46 (1): 20-27.
4. Needleman A.R. & Crandell C.: Speech recognition in noise by hearing-impaired and noise-masked normal hearing listeners. *Jour Amer Acad Audiol* 1995; 6:414-24.
5. Killion M.: The SIN report: Circuits haven't solved the hearing-in-noise problem. *Hear Jour* 1997; 50 (10):28-32.
6. Agnew J. & Block M.: HINT Thresholds for a Dual-Microphone BTE. *Hearing Review* 1997; 26, 29-30.
7. Agnew J.: Challenges and some Solutions for Understanding Speech in Noise. *High Performance Hearing Solutions 1999 (Vol. 3) Suppl to Hearing Review*, 6 (1):4-9.
8. Valente M.: Use of Microphone Technology to Improve User Performance in Noise. *Trends in Amplification* 1999; 4 (3):112-135.
9. Wolf R.P., Hohn W., Martin R. & Powers T.A.: Directional microphone hearing Instruments: How and why they work. *High Performance Hearing Solutions 1999 (Vol. 3); Suppl to Hearing Review* 6(1):4-25.
10. Valente M.: The bright promise of microphone technology. *Hear Jour* 1998; 51(7):10-19.
11. Ricketts T. & Dhar S.: Comparison of Performance across three Directional Hearing Aids. *Jour Amer Acad Audiol* 1999; (10): 180-189.
12. Thompson S.C.: Dual microphones or directional-plus omni : Which is best?

High Performance Hearing Solutions 1999 (Vol. 3); Suppl to Hearing Review, 6 (1):31-35.

13. Chasin M.: Improving signal-to-noise ratio with directional microphones. *Hearing Instruments* 1996; 45 (2):31-33.

14. Madison T.K. & Hawkins D.B.: The signal-to-noise ratio advantage of directional microphones. *Hear Instrum* 1983; 34 (2):18,49.

15. Mueller G.H., Grimes A.M. & Erdman S.A.: Subjective ratings of directional amplification. *Hear Instrum* 1983; 34:14-16,47.

16. Hawkins D.B. & Yacullo W.S.: Signal-to-noise ratio advantage of binaural hearing aids and directional microphones under different levels of reverberation. *Jour Speech and Hear Disorders* 1984; 49:278-86.

17. Nielsen H.B. & Ludvigsen C.: Effect of hearing aids with directional microphones in different acoustic environments. *Scand Audiol* 1978; 7 (4):217-224.

18. Valente M., Fabry D.A. & Potts L.G.: Recognition of speech in noise with hearing aids using dual microphones. *Jour Amer Acad Audiol* 1995; 6:440-9.

19. Lurquin F. & Raphay S.: Intelligibility in noise using multi-microphone hearing aids. *Acta Oto-Rhino-Laryngologica (Belgica)* 1996; 50:103-109.

20. Kochkin S.: Customer satisfaction and subjective benefit with high performance hearing aids. *Hearing Review* 1996; 3 (12): 16-26.

21. Voss T.: Clinical evaluation of multi-microphone hearing instruments. *Hearing Review* 1997; 4:36,45,74.

22. Gravel J.S., Fausel N., Liskow C. & Chobot J.: Children's speech recognition in noise using omni-directional and dual-microphone hearing aid technology. *Ear and Hear* 1999; 20:1-11.

23. Kühnel V., Margolf-Hackl S. & Kiessling J.: Multi-microphone technology for severe-to-profound hearing loss. *Scand Audiol Suppl* 1999; in press.

24. Schuchman G., Valente M., Beck L. & Potts L.: User Satisfaction with an ITE Directional Hearing Instrument. *Hearing Review* 1999; 6 (7):12,16,21-22.

25. Valente M., Sweetow R. & May A.: Using microphone technology to improve speech recognition, High Performance Hearing Solutions 1999 (Vol. 3); Suppl to Hearing Review, 6 (1):10-13.

26. Pumford J.M., Scollie S.D. & Jenstad L.M.: Speech recognition with in-the-ear and behind-the-ear dual-microphone hearing instruments. Jour Amer Acad Audiol 2000; 11 (1):23-35.

27. May A., Larsen C. & Warland A.:

Multi-microphone instruments, DSP and hearing-in-noise. Hearing Review 1998; 5:42-45.

28. Bille M., Jensen A.M., Kjoerbol E., Vesterager V., Sibelle F. & Nielsen H.: Clinical study of a digital vs. an analogue hearing aid. Scand Audiol 1999; 28:127-135.

29. Valente M., Sweetow R., Potts L.G. & Bingea B.: Digital versus analog signal processing: effect of directional microphone. Jour Am Acad Audiol 1999;10:133-150.

30. Kuk F.K., Kollofski C., Brown S., Melum A. & Rosenthal A.: Use of a digital hearing aid with directional microphones in school-aged children. Jour Amer Acad Audiol 1999; 10 (10):535-548.

31. Kollmeier B. & Wesselkamp M.: Development and evaluation of a German sentence test for objective and subjective speech intelligibility assessment. J Acoust Soc Amer 1997; 102 (4):2412-242.