

Technologie de capteurs 4D et Réseau Neuronal Profond 2.0 dans Oticon Intent™

Revue techniques et évaluations

RÉSUMÉ

Oticon Intent™ vient de franchir une autre étape importante dans l'optimisation du soutien auditif pour les personnes souffrant de pertes auditives, en particulier lorsqu'elles écoutent dans le bruit. Ce livre blanc passe en revue deux innovations majeures de MoreSound Intelligence (MSI) 3.0 : la technologie de capteurs 4D et le nouveau Réseau Neuronal Profond (RNP) 2.0. La technologie de capteurs 4D estime l'intention d'écoute de l'utilisateur dans une situation et un environnement donnés en combinant les signaux d'un nouveau capteur de mouvement et de capteurs acoustiques. Cette information combinée permet une meilleure utilisation du système d'assistance dans le bruit pour fournir le niveau de soutien approprié répondant aux intentions de l'utilisateur dans la situation d'écoute spécifique. De plus, le nouveau RNP 2.0 a fait l'objet d'un entraînement amélioré, et offre maintenant une suppression du bruit supérieure à celle des aides auditives Oticon précédentes. Nous présentons également des preuves techniques qui montrent qu'Oticon Intent surpasse les performances d'Oticon Real. Alors que la technologie traditionnelle se contente de fournir un niveau de soutien fixe dans un environnement sonore donné, Oticon Intent fournit un soutien à l'écoute basé sur l'intention d'écoute de l'utilisateur, et ce, sur une plage d'adaptation de 5 dB du RSB en sortie. Les résultats montrent également qu'Oticon Intent offre 35 % de plus d'accès aux signaux vocaux qu'Oticon Real et atténue mieux le bruit de fond tout en préservant les détails de la parole, ce qui permet à l'utilisateur de bénéficier d'une scène sonore plus claire. Dans l'ensemble, Oticon Intent affiche des performances supérieures dans les environnements bruyants. Il fournit la quantité appropriée de soutien aux utilisateurs lorsqu'ils en ont le plus besoin.

01	Résumé
02	Traitement MoreSound Intelligence 3.0
04	La nouvelle technologie d'Oticon Intent
10	Évaluation technique d'Oticon Intent
14	Conclusion
15	Références

RÉDACTEURS DE L'ÉDITION

Mette Brændgaard*, Valentina Zapata-Rodríguez*, Ioana Stefanu, Raul Sanchez-Lopez, Sébastien Santurette
Centre de recherche en audiologie appliquée, Oticon A/S

* Paternité partagée des travaux

Malgré les progrès des stratégies de traitement de signal utilisées par les aides auditives modernes, les personnes souffrant de pertes auditives restent confrontées à des difficultés de compréhension des conversations dans les environnements bruyants. La technologie traditionnelle ajuste le niveau de soutien en fonction de la complexité acoustique de l'environnement. Cependant, le besoin d'un meilleur soutien dans les situations d'écoute complexes est un domaine qui nécessite de plus amples développements (Picou, 2020).

Basé sur la nouvelle plateforme Sirius™, Oticon Intent™ présente une technologie qui, pour la première fois, tient compte de l'intention de l'utilisateur lors du traitement du son. Intégrée à MoreSound Intelligence™ 3.0 (MSI 3.0), cette technologie de capteurs 4D combine quatre types différents de capteurs d'entrée, que l'aide auditive utilise pour comprendre les besoins d'écoute de l'utilisateur et agir en conséquence. Les quatre éléments détectés par le capteur sont : le mouvement de la tête, le mouvement du corps, l'activité de conversation et l'analyse acoustique de la scène sonore. Outre cette nouvelle technologie de capteurs 4D, Oticon Intent utilise un Réseau Neuronal Profond de deuxième génération (RNP 2.0) pour encore plus de clarté et de contraste dans les environnements difficiles. Cela permet à Oticon Intent d'offrir une assistance à l'écoute ciblée en prédisant l'intention d'écoute de l'utilisateur. Il s'agit d'une approche plus complète des besoins de l'utilisateur qui ne se base pas uniquement sur l'analyse de la complexité acoustique de l'environnement et de simples détecteurs de mouvement pour désactiver la directivité. Ce document aborde les aspects techniques et l'évaluation de MSI 3.0, y compris la nouvelle technologie de capteurs 4D et le RNP 2.0.

Traitement MoreSound Intelligence 3.0

MSI 3.0 sert de système de soutien dans le bruit dans Oticon Intent. Cette section décrit chaque partie du processus de traitement dans MSI 3.0 (Figure 1) et consiste en une brève présentation du processus, suivie de quelques détails sur chaque composant.

Vue d'ensemble du flux de traitement MSI 3.0

Le processus de traitement de MSI 3.0 commence avec le Wind & Handling Stabilizer (stabilisateur pour le vent et la manipulation) qui reçoit le son des 2 microphones, nettoie le signal et élimine les bruits inconfortables et dérangeants en fonction des besoins. Il peut s'agir, par exemple, du bruit créé par le vent qui souffle sur les entrées du microphone ou du bruit des doigts manipulant l'appareil ou des cheveux qui frottent contre les entrées du microphone.

La partie suivante du processus repose sur la technologie de capteurs 4D. Cette partie traite des informations concernant les sons de l'environnement, les mouvements de la tête et du corps de l'utilisateur et son activité de conversation. Ces nouvelles données, ainsi que celles provenant des détecteurs de niveau et du rapport signal/bruit (RSB), déjà utilisées dans les versions existantes de MSI, sont analysées, combinées et utilisées pour déterminer comment les parties restantes du système de soutien doivent traiter la scène sonore. L'analyse est conçue pour déterminer l'intention de l'utilisateur dans la situation donnée et pour assurer une gestion correcte du son entrant en fonction de ses besoins. De plus, elle est conçue pour affecter plus ou moins de soutien selon que l'environnement est plus difficile (chemin difficile) ou moins difficile (chemin facile) pour un utilisateur spécifique. La quantité de soutien engagée est personnalisée

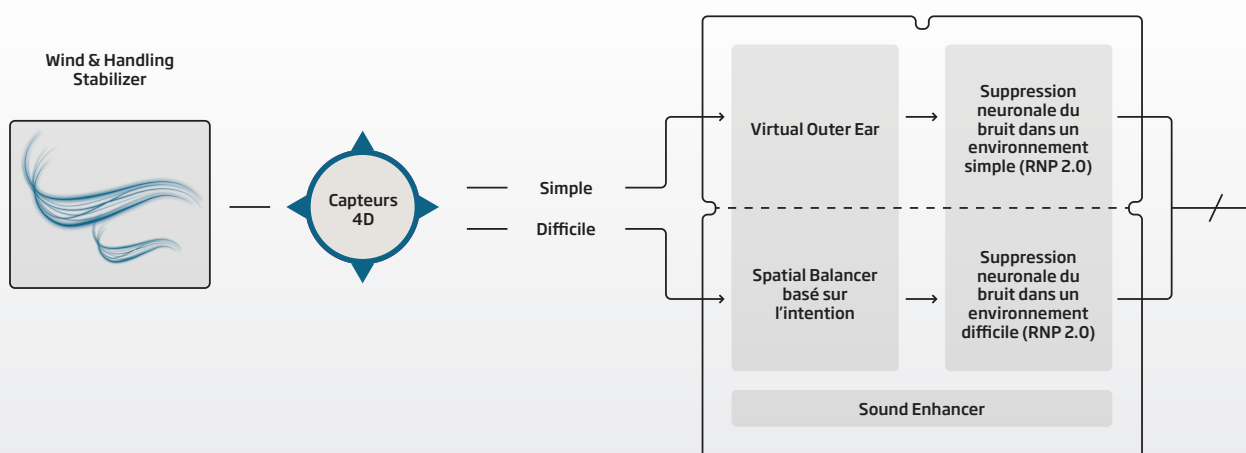


Figure 1. Vue d'ensemble du processus de traitement dans MoreSound Intelligence 3.0.

et définie par le logiciel Oticon Genie 2. Dans cette plage personnalisée, la sortie de la technologie de capteurs 4D configure le niveau de soutien en fonction de la complexité de la situation et de l'intention d'écoute de l'utilisateur.

Pour le chemin facile, Virtual Outer Ear recrée les indices spatiaux autrement perdus lorsque l'aide auditive est placée derrière l'oreille. Ensuite, le RNP 2.0 gère les sources de bruit diffuses pour accroître la clarté et le confort de l'utilisateur.

Dans le chemin difficile, Spatial Balancer basé sur l'intention gère les sources sonores distinctes et séparées dans l'espace et offre une clarté et un contraste optimaux entre la parole et les autres sources sonores. Ensuite, le traitement par le RNP 2.0 traite les sources de bruit diffuses restantes tout en optimisant davantage le contraste et la clarté. Et pendant que tout cela se produit, l'aide auditive fournit également un accès aux sons tout autour.

Sound Enhancer est la dernière partie du processus de traitement MSI 3.0. Cette fonction est appliquée de façon adaptative au signal équilibré et débruité pour assurer la présence de détails subtils dans les fréquences importantes pour la parole en fonction des besoins de l'utilisateur.

Les sections suivantes abordent plus en détail chaque partie de MSI 3.0.

Wind & Handling Stabilizer

Wind & Handling Stabilizer détecte et empêche les bruits du vent et de manipulation d'entrer dans le système de traitement du son de l'aide auditive.

Le bruit du vent provoque des turbulences qui sont détectées lorsqu'elles pénètrent dans le microphone de l'aide auditive. Ces turbulences provoquent un bruit indésirable dans l'aide auditive, semblable à celui que l'on obtient en soufflant de l'air sur un microphone à main.

WHS surveille la présence de bruit non corrélé créé par le vent ou la manipulation dans chaque microphone de l'aide auditive et détermine quel microphone reçoit le plus de bruit. WHS détecte les changements de présence de vent et de bruit de manipulation à raison de 500 fois/sec, grâce à l'activité permanente du détecteur. L'atténuation des bruits de vent et de manipulation est

dynamique, c'est-à-dire qu'elle n'est active que lorsque ces bruits sont détectés. Le système utilise les deux microphones sur toute l'étendue fréquentielle dans toutes les situations autres que celles impliquant le vent direct et la manipulation. Cependant, en cas de détection de vent, il est préférable de couper les bandes de fréquence affectées d'un microphone. Le microphone qui reçoit le moins de bruit est privilégié et certaines bandes de celui qui présente le plus de turbulences sont désactivées momentanément. WHS coupe un microphone seulement dans la mesure nécessaire en termes de durée et d'intervalles de fréquence, tout en veillant à ce que le signal d'entrée à deux microphones soit conservé le plus longtemps possible et dans le plus grand nombre de canaux de fréquence possible.

Les systèmes traditionnels de gestion du bruit du vent sont efficaces pour atténuer le bruit du vent dans les basses fréquences jusqu'à environ 1 500 Hz, ce qui assure le confort de l'utilisateur. Cependant, un avantage supplémentaire de WHS réside dans l'atténuation précise et efficace du bruit du vent dans les fréquences supérieures à 1 500 Hz, qui est considérablement améliorée par rapport aux systèmes de gestion du vent précédents.

Pour obtenir de plus amples informations sur le WHS, voir le livre blanc d'Oticon publié par Gade et coll. (2023).

Technologie de capteurs

Depuis de nombreuses années déjà, les aides auditives sont en mesure de détecter des informations sur les niveaux sonores environnementaux et le rapport signal/bruit (RSB). Ces informations sont utilisées pour déterminer comment traiter les sons autour de l'utilisateur. Ainsi, les utilisateurs ayant les mêmes paramètres dans Oticon Genie 2 recevaient jusqu'à présent le même traitement et le même soutien dans un même environnement donné, quelles que soient leurs intentions d'écoute. Cela change avec Oticon Intent et l'intégration de la technologie de capteurs 4D : voir la description détaillée fournie plus loin ci-dessous dans la section « Technologie de capteurs 4D ».

Virtual Outer Ear

La capacité à localiser des sources sonores dans l'environnement spatial est une capacité importante qui devient plus difficile en présence d'une perte auditive (Akeroyd, 2014). Nous avons tous des oreilles de tailles différentes, avec des pavillons de formes différentes. Par

conséquent, le son est modifié de différentes manières lorsqu'il pénètre dans le conduit auditif, en fonction de l'anatomie de l'oreille. Par exemple, en raison de la forme de l'oreille externe, certaines personnes auront une focalisation plus ou moins frontale que d'autres. Lorsque nous plaçons les microphones de l'aide auditive derrière l'oreille, la possibilité d'utiliser les indices spatiaux naturels fournis par le pavillon de l'oreille est éliminée. Cette capacité doit être recrée par le traitement du signal dans l'aide auditive.

L'oreille externe virtuelle Virtual Outer Ear (VOE) et l'équilibreur spatial basé sur l'intention (Intent-based Spatial Balancer) aident à recréer cette sensation spatiale dans des environnements simples et difficiles, respectivement. VOE contient trois modèles différents de pavillons réalistes qui recréent des indices spatiaux pour aider l'utilisateur à recréer la localisation spatiale dans des environnements simples.

Lors d'études récentes dans le cadre desquelles nous avons caractérisé 130 paires d'oreilles, nous avons constaté que la plupart des gens présentent une amplification naturelle d'environ 0,5-1 dB dans la zone de 2 à 5 kHz de l'oreille externe. Sur la base de ces caractéristiques, nous avons créé un modèle de pavillon aussi naturel et précis que possible. Nos mesures montrent que l'effet du pavillon sur le son peut varier d'une oreille à l'autre. Cela implique que la perception sonore dépend de l'anatomie de l'oreille externe. Pour tenir compte des différences individuelles, VOE compte trois réglages différents, avec une focalisation frontale légèrement plus ou moins marquée. Ces réglages peuvent être définis dans le logiciel d'adaptation Oticon Genie 2 selon les préférences de l'utilisateur. Le réglage avec une focalisation légèrement plus frontale est créé par une modeste réduction du niveau à l'arrière, spécifique à certaines fréquences, tandis que celui offrant une meilleure conscience de l'environnement permet à l'utilisateur de percevoir plus de sons provenant de l'arrière.

Spatial Balancer basé sur l'intention

Spatial Balancer basé sur l'intention est une fonctionnalité plus puissante que VOE dédiée aux environnements difficiles. Spatial Balancer basé sur l'intention équilibre rapidement des sources sonores distinctes dans l'environnement en utilisant à la fois un signal omnidirectionnel et un signal rétro-cardioïde des deux microphones. Le signal omnidirectionnel fournit tous les sons du paysage sonore, y compris les sons frontaux. Le signal rétro-cardioïde en fait de même, mais exclut

les sons frontaux. Les deux signaux sont comparés en permanence pour définir l'emplacement précis des sources de bruit. Spatial Balancer basé sur l'intention utilise un filtrage spatiale sans distorsion à variance minimale (MVDR beamformer) afin d'atteindre l'équilibre optimal pour la scène sonore donnée en créant un contraste plus important entre les sons significatifs et moins significatifs (souvent du bruit).

Spatial Balancer basé sur l'intention augmente le RSB en supprimant les sources de bruit individuelles (en réduisant le niveau dans la direction de la source de bruit), en les plaçant en arrière-plan et en créant ainsi une scène sonore équilibrée.

Pour obtenir de plus amples informations sur VOE et Spatial Balancer, voir Brændgaard (2020).

Réseau Neuronal Profond 2.0

Le Réseau Neuronal Profond 2.0 (RNP 2.0) a été entraîné pour reconnaître ce qui devrait être mis en valeur (sons d'intérêt contenant beaucoup d'informations) et ce qui devrait être moins perceptible (sons de moins d'intérêt avec moins d'informations). L'entraînement a été amélioré pour créer une meilleure clarté et un meilleur contraste entre les sources sonores. Une description détaillée de l'entraînement amélioré est fournie dans la section « RNP de nouvelle génération » ci-dessous.

Sound Enhancer

Normalement, l'effet maximal d'un système de suppression du bruit est un compromis qui fonctionne raisonnablement bien pour la plupart des utilisateurs. Le traitement du son dans l'aide auditive doit s'assurer que l'utilisateur peut gérer les sons de l'environnement tout en conservant l'impression globale de la scène sonore. Sound Enhancer fournit des détails sonores dynamiques lorsque la suppression du bruit est active et permet d'individualiser la sortie par le biais de trois profils sonores distincts. Ces profils sont conçus pour améliorer la suppression du bruit ou la clarté de la parole. Le profil par défaut (Équilibré) combine les deux précédents. Quel que soit le profil utilisé, Sound Enhancer fournit des détails supplémentaires dans la plage de 1 à 4 kHz, qui regroupe les fréquences principales des sons vocaux. Pour obtenir de plus amples informations sur Sound Enhancer, voir Brændgaard (2020).

La nouvelle technologie d'Oticon Intent

Technologie de capteurs 4D

Oticon Intent présente la technologie de capteurs 4D, qui incorpore de nouveaux capteurs dans le système d'aide dans le bruit tout en conservant les détecteurs de niveau et de RSB traditionnels afin de déterminer l'environnement sonore. Cette nouvelle technologie de capteurs 4D fournit des informations à partir de quatre dimensions : les mouvements du corps, les mouvements de la tête, l'activité de conversation et l'environnement acoustique. Ces informations sont utilisées pour déterminer l'intention d'écoute de l'utilisateur à un moment donné. L'interprétation de l'intention de l'utilisateur est utilisée par le reste de MSI 3.0 et garantit un soutien approprié dans chaque situation d'écoute unique en fonction de l'intention de l'utilisateur. Cette section décrit les différents capteurs.

Capteur de mouvement

Des études ont montré que les auditeurs ont tendance à orienter leur corps d'une certaine manière dans les situations de communication (Hadley et coll., 2019, 2020 ; Hadley et Culling, 2022) et que les mouvements de la tête et du corps révèlent nos intentions d'écoute (Higgins et coll., 2023). En ajoutant des données de capteur de mouvement aux données environnementales également collectées par l'aide auditive, le traitement du son et le soutien appliqué sont administrés sur une base beaucoup plus robuste et soutiennent mieux la façon dont le cerveau interprète les sons (Bianchi/Eskelund et coll., 2024). L'aide auditive dispose d'un accéléromètre intégré pour détecter les mouvements de la tête et du corps de l'utilisateur, qui représentent deux des quatre dimensions

analysées. L'accéléromètre est un petit capteur de mouvement économe en énergie, et donc particulièrement indiqué pour une utilisation dans une aide auditive.

L'accéléromètre mesure l'accélération des mouvements de l'utilisateur. Plus le mouvement est rapide et vigoureux, plus l'impact sur l'accéléromètre est important. L'accéléromètre mesure le mouvement selon trois axes différents : X, Y et Z (voir la figure 2).

L'accéléromètre est étalonné en fonction de sa position sur l'oreille. Le placement correct de l'aide auditive sur l'oreille est donc d'autant plus important. Le suivi des mouvements de l'utilisateur assuré par l'accéléromètre est utilisé pour interpréter l'intention de l'utilisateur :

- L'activité sur l'axe Z indique un mouvement complet du corps (comme la marche et la course), ce qui peut indiquer qu'une conscience accrue de l'environnement est essentielle.
- L'activité sur les axes X et Y indique un hochement de tête et des mouvements vers les côtés, qui peuvent indiquer la participation à une conversation avec plusieurs personnes.
- Une activité limitée sur les axes X et Y signifie que l'utilisateur est immobile, ce qui tend à indiquer qu'une attention totale est nécessaire, pour participer à une conversation intime.

Le type de mouvement est combiné avec l'activité de conversation et l'environnement acoustique (décrits ci-dessous) pour interpréter l'intention de l'utilisateur.

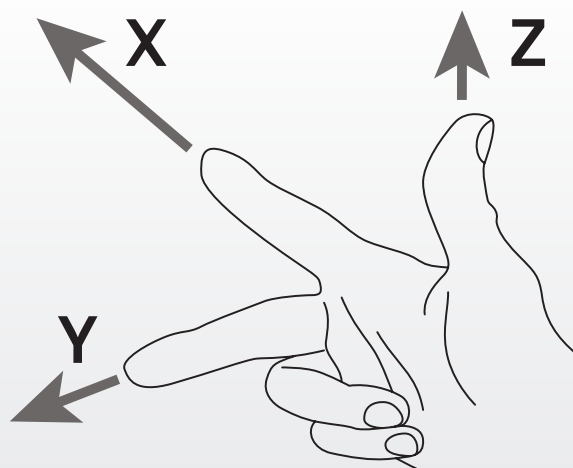


Figure 2. Les trois axes - X, Y et Z - mesurés par le capteur de mouvement.

Activité de conversation

L'activité conversationnelle est la troisième dimension de la technologie de capteurs 4D. L'activité de conversation contribue à la détermination de l'intention de l'utilisateur en détectant si la parole est présente. S'il n'y a pas de parole détectable dans le demi-plan frontal, il n'y a pas de conversation en cours.

L'activité de conversation est déterminée en fonction de la modulation détectée dans le signal et du calcul d'un rapport signal/bruit (RSB) se trouvant approximativement dans la plage de RSB où les personnes dotées d'une audition normale peuvent comprendre la parole.

Environnement acoustique

La quatrième dimension de la technologie de capteurs 4D est l'environnement acoustique. Ce capteur est intégré au système pour s'assurer que le soutien est fourni dans les environnements où il est nécessaire. Dans les environnements faciles présentant de faibles niveaux de bruit et un bon RSB, les gens communiquent généralement bien sans aucun soutien supplémentaire de l'aide auditive autre que l'amplification.

Ce capteur détecte les niveaux sonores en dB SPL. La détermination du niveau de difficulté d'un environnement sonore est individualisée par les paramètres dans Oticon Genie 2. Ces paramètres s'adaptent à ce que l'utilisateur considère être un environnement de communication facile ou difficile. Les paramètres sont personnalisés en fonction des questions de personnalisation ou de la valeur du seuil d'audibilité de contraste (ACT™) en tant qu'évaluation des capacités de perception de la parole dans le bruit de la personne. En fonction du niveau de pression sonore global, le capteur active (ou non) le système de suppression du bruit pour fournir une

suppression supplémentaire du bruit. Le seuil d'activation d'une suppression supplémentaire du bruit se situe entre environ 45 et 60 dB SPL en fonction du réglage personnel. De même, l'effet maximum est observé entre environ 62 et 72 dB SPL, en fonction du réglage personnel.

Résultat de la technologie de capteurs 4D

Les capteurs surveillent constamment les mouvements, l'activité de conversation et le son dans l'environnement pour fournir la bonne entrée au système. Chaque capteur contribue le résultat de sa propre analyse. Ces résultats sont combinés pour former un seul ensemble raffiné de paramètres pour que les fonctionnalités restantes de MSI 3.0 (Spatial Balancer basé sur l'intention et RNP 2.0) puissent agir. Cet ensemble définit le niveau de support nécessaire à l'intention de l'utilisateur et à l'environnement sonore (voir la figure 3). Le système d'aide fournit la quantité d'aide appropriée, car un soutien différent de l'aide auditive est nécessaire en fonction de ce que l'utilisateur fait dans la situation spécifique. Par exemple, lorsque l'utilisateur se déplace dans la pièce, une plus grande conscience de l'environnement est utile, lorsqu'il participe à une conversation de groupe dynamique, il est important d'intervenir au bon moment, ou lorsqu'il prend part à une conversation intime, toute son attention est concentrée sur son interlocuteur. Indépendamment de l'intention interprétée et du soutien fourni, les sons de toutes les directions sont disponibles en tout temps, mais l'équilibre entre les différents sons peut varier.

Le système adapte le soutien en effectuant une transition lente et fluide dans la plage de traitement de signal sans aucun saut entre des modes fixes. Cela permet de présenter des sons clairs et confortables pour l'utilisateur de l'aide auditive. La plage dans laquelle le système de soutien peut effectuer la transition dépend



Figure 3. Le processus de la technologie de capteurs 4D : les capteurs 4D recueillent des données d'entrée dans les quatre dimensions, l'entrée est évaluée pour interpréter l'intention de l'utilisateur et combinée en un seul ensemble de paramètres qui définissent la quantité d'aide appropriée pour que les fonctionnalités restantes de MSI 3.0 puissent agir.

des paramètres individuels choisis dans Oticon Genie 2 et de l'environnement sonore.

La figure 4 montre l'amélioration du RSB de l'aide auditive, mesurée en dB avec les paramètres par défaut. La plage de traitement de signal dans laquelle l'adaptation du soutien fourni par la technologie 4D Sensor peut transitionner est représentée par la zone bleu clair. La plage d'amélioration du RSB de sortie sur l'axe vertical (plus de contraste entre la parole et les sons environnants contre plus de conscience des sons environnants) varie en fonction du RSB d'entrée sur l'axe horizontal (complexité de l'environnement d'écoute). L'aide fournie dépend des intentions de l'utilisateur telles qu'interprétées par les analyses des mouvements de la tête et du corps, de l'activité de la conversation et de l'environnement acoustique. Les lignes pleines bleu foncé reflètent l'adaptation maximale et minimale du soutien. La ligne en pointillés bleus est la courbe correspondant aux mêmes paramètres par défaut dans Oticon Genie 2, mais avec la technologie de capteurs désactivée, ignorant ainsi l'intention d'écoute de l'utilisateur. Pour plus d'explications sur les mesures présentées à la figure 4, voir la section « Adaptation accrue du soutien aux besoins d'écoute individuels » ci-dessous.

Adaptation avec la technologie de capteurs 4D

La technologie de capteurs 4D est disponible dans les programmes Général et Parole dans le bruit lors de l'adaptation dans Oticon Genie 2. Pour que la technologie de capteurs 4D soit disponible, le mode neuronal dans MSI 3.0 doit être activée. Le mode neuronal et la technologie de capteurs sont tous les deux activés par défaut.

RNP de nouvelle génération

La structure d'un RNP est inspirée par la façon dont notre cerveau est organisé, à savoir les neurones et leurs synapses correspondantes. Le réseau neuronal recourt à l'apprentissage itératif. Il s'appuie sur une énorme quantité de données du monde réel pour en apprendre davantage sur le son et sur la façon de le traiter. L'apprentissage itératif du RNP remplace les anciennes méthodes de traitement du son qui étaient basées sur un ensemble strict d'algorithmes préétablis, de conception humaine. Notre approche en matière de RNP permet au traitement du son et à la gestion du bruit de sortir du laboratoire et de s'intégrer au monde réel. Les réseaux neuronaux sont basés sur des algorithmes d'apprentissage profond. Les algorithmes d'apprentissage profond prennent de grandes quantités de données, appelées échantillons d'entraînement, et développent un système capable d'en tirer des leçons.

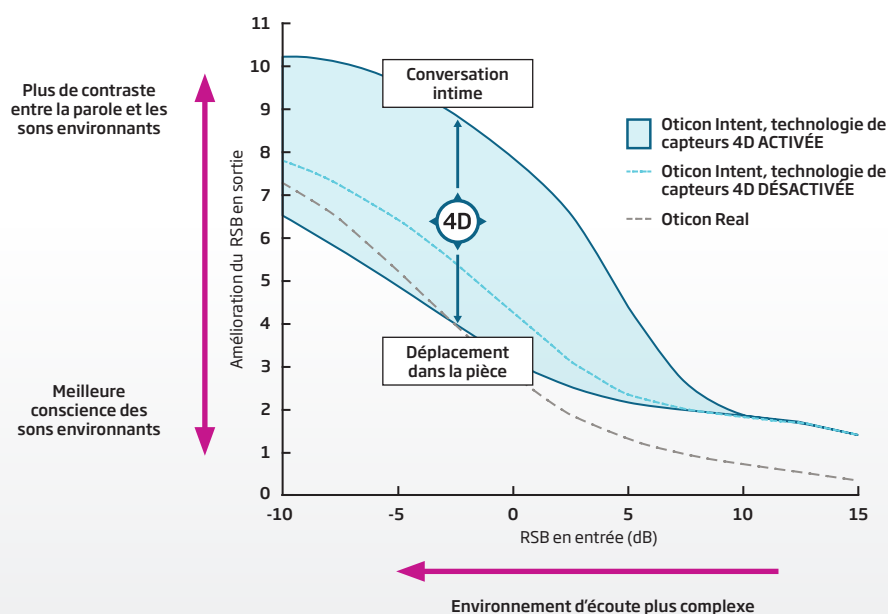


Figure 4. Amélioration du RSB mesurée dans Oticon Intent et Oticon Real avec les paramètres par défaut. La zone bleu clair montre l'adaptation du soutien en tant qu'amélioration flexible du RSB avec la technologie de capteurs activée dans Oticon Intent, et la ligne en pointillés bleus montre l'amélioration fixe du RSB lorsque la technologie de capteurs est désactivée dans Oticon Intent. La ligne en pointillés gris montre l'amélioration fixe du RSB dans Oticon Real.

Le caractère unique des réseaux neuronaux découle de leur similitude architecturale avec le cerveau. Dans les réseaux neuronaux, il existe une unité de base appelée neurone. Le but d'un neurone, un peu comme un neurone relais dans le cerveau, est de recevoir des informations, de les stocker et enfin de les transmettre au neurone suivant. Un groupe de neurones forme une couche. De multiples couches spécialisées interconnectées forment le réseau neuronal. Celui-ci est composé d'une couche d'entrée au début, de couches cachées au milieu et d'une couche de sortie à la fin.

La couche de sortie produit un résultat sous forme de signal acoustique que nous pouvons entendre. Il s'agit de la classe la plus élémentaire des réseaux neuronaux. Les couches d'entrée et de sortie ont 24 neurones correspondant aux 24 canaux de traitement. La suppression du bruit est appliquée de manière adaptative en fonction des informations fournies par les différents capteurs mentionnés précédemment.

Le RNP 2.0 est une nouvelle génération de réseau neuronal profond développée avec des cycles d'entraînement complètement nouveaux. Pour donner un aperçu de la façon dont le nouvel entraînement a été effectué, cette section examinera les quatre étapes du processus. Les étapes sont illustrées à la figure 5 : Entrée (A) - le RNP reçoit les informations concernant la scène sonore, Propagation -avant (B) - le RNP traite la scène sonore,

Sortie (C) - le RNP produit la sortie audible, et Propagation-arrière (D) - une rétroaction est fournie pour améliorer davantage le traitement dans le RNP.

Notre objectif était d'entraîner le RNP au sujet des scènes sonores afin qu'il puisse résoudre la tâche d'équilibrage des sources sonores en préservant les indices et en atténuant le bruit. La grande quantité de données nécessaires à cet entraînement a été enregistrée dans différentes scènes sonores représentant un large éventail d'environnements d'écoute avec des scènes sonores auxquelles les gens sont généralement exposés dans leur vie quotidienne. Nous avons utilisé un microphone sphérique spécialisé, capable de capturer des sons à 360 degrés pour fournir au RNP une représentation spatiale précise et détaillée de la scène sonore et pour l'entraîner à l'analyse de la scène sonore dans son intégralité.

Par rapport à l'entraînement de la génération précédente, les étapes A, C et D du RNP dans le processus d'entraînement ont été améliorées, conduisant par la même occasion à une amélioration de l'étape B.

Au cours de l'étape d'entrée (A), les neurones reçoivent des informations d'une scène sonore et les stockent. Les échantillons sonores utilisés pour l'entraînement du RNP 2.0 sont plus diversifiés que ceux utilisés pour l'entraînement du RNP de la génération précédente. L'entraînement du RNP 2.0 utilise principalement des

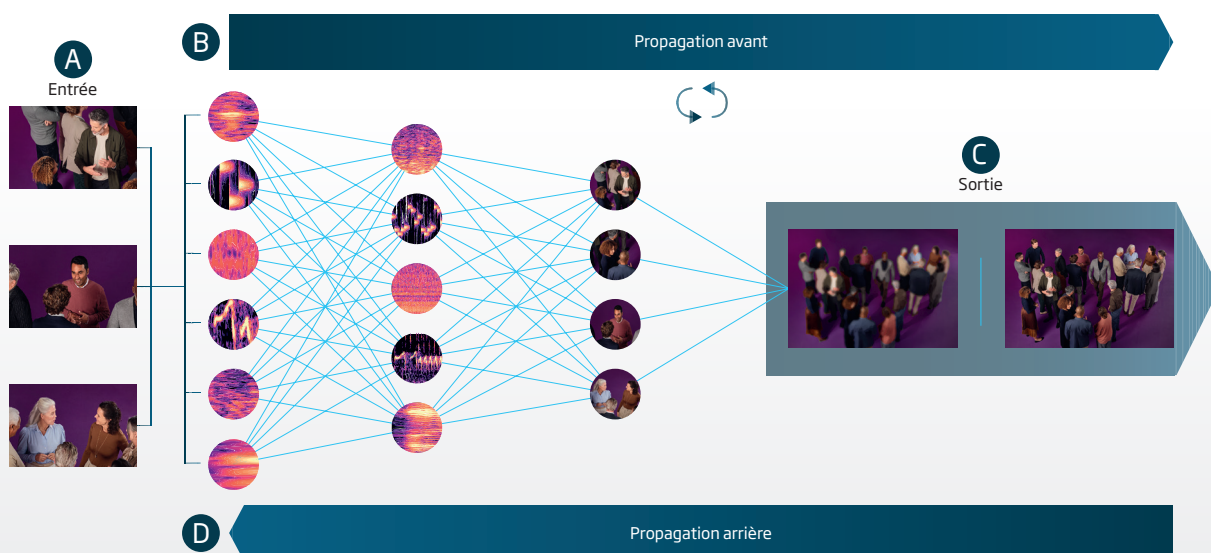


Figure 5. Le processus d'entraînement du RNP. Voir le texte pour plus d'explications.

scène sonores complexes pour assurer une meilleure réponse aux environnements sonores que le RNP devra traiter dans le monde réel.

Ensuite, la propagation -avant (B) transfère les données d'entrée de chaque neurone et les transmet à la couche suivante. Le volume d'informations transmises dépend de la force de la connexion entre les neurones. Le RNP 2.0 dispose de 24 canaux dans les couches d'entrée et de sortie, tout comme le reste du schéma de traitement dans MSI 3.0. Ce qui se passe dans cette étape est défini par le RNP, et il fonctionne sans aucune restriction de la part des développeurs. Ainsi, grâce à de nouveaux cycles d'entraînement et à la mise à jour des autres étapes du processus d'entraînement, cette étape est automatiquement mise à jour.

Une fois l'étape de propagation -avant terminée, le RNP 2.0 effectue une prédiction de sortie (C) des sons qu'il détermine comme devant être améliorés ou supprimés de la scène sonore. Ces informations sont analysées et comparées à une cible souhaitée : une scène sonore réelle. L'analyse est effectuée sur 256 canaux (contre 24 canaux pour la génération précédente du RNP) afin de veiller à ce que chaque erreur commise dans le traitement par le RNP2.0 pendant l'entraînement soit capturée et corrigée. La comparaison avec la cible est effectuée à l'aide de définitions améliorées des paramètres d'entraînement qui mettent l'accent sur la

préservation de la parole, l'atténuation du bruit, la minimisation de la perte d'énergie due aux sons similaires à la parole, la stabilité du gain, des sons clairs et non déformés, et faire en sorte que le RNP 2.0 ne s'active que lorsque cela est nécessaire, comme indiqué par l'audioprothésiste lors de l'adaptation (ou par les paramètres par défaut d'Oticon Genie 2).

Lors de la dernière étape du processus, nous enseignons au RNP 2.0 comment apprendre de ses erreurs et s'adapter. Cette action est à la source du processus de propagation -arrière (D), grâce auquel le RNP 2.0 modifie les connexions individuelles entre les neurones pour mieux supprimer les sons appropriés. Le processus est répété pour toutes les scènes sonores jusqu'à ce qu'un plateau soit atteint. L'ensemble du processus d'entraînement est ensuite répété avec de nouvelles scènes sonores. Ce processus apprend au RNP 2.0 comment identifier les caractéristiques de chaque son et à mieux les distinguer. Au fil du temps, la capacité du RNP 2.0 à renforcer les sons significatifs et supprimer les non significatifs s'améliore.

Pour une description plus détaillée de la construction et de l'entraînement d'un RNP, voir Brændgaard (2020) et Andersen et coll. (2021).

Le RNP 2.0 est une version améliorée de la génération précédente de RNP. Il produit un son de sortie plus clair

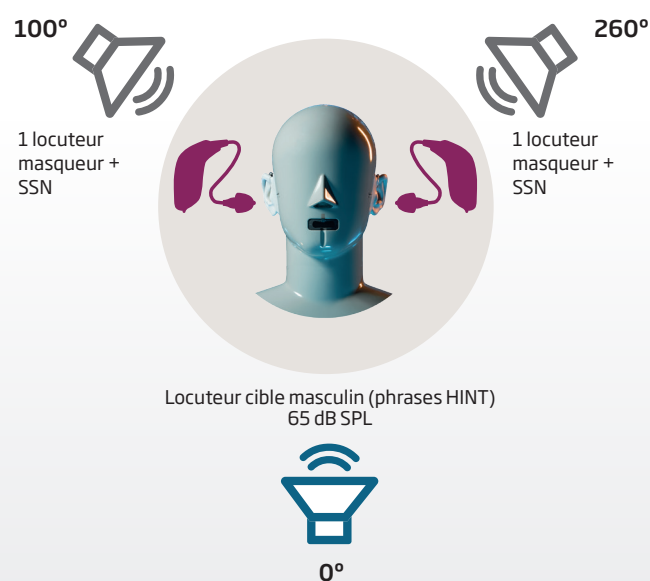


Figure 6. Configuration de mesure avec un locuteur cible à l'avant et des locuteurs interférents mélangés à du bruit en forme de parole (SSN) sur les côtés.

tout en préservant davantage les indices d'origine. En raison de l'analyse accrue de 256 canaux dans le processus d'entraînement, le RNP 2.0 peut également fournir plus d'atténuation (jusqu'à 12 dB dans des environnements difficiles) sans entraîner de distorsion du son. Pour obtenir de plus amples informations sur les avantages du RNP 2.0, consultez la section « Test du RNP actualisé » ci-dessous.

Le RNP 2.0 est à régler dans Oticon Genie 2 dans la section Suppression neuronale du bruit. Le réglage par défaut est fixé à 2 dB pour les environnements simples et 10 dB pour les environnements difficiles. Les paramètres peuvent être personnalisés avec d'autres paramètres de MSI 3.0 en fonction des questions de personnalisation ou de la valeur du seuil d'audibilité de contraste (ACT) (Santurette & Laugesen, 2023) ou encore en fonction des commentaires et des besoins du client. Les réglages possibles sont 0, 2, 4 et 6 dB pour les environnements simples et 6, 8, 10 et 12 dB pour les environnements difficiles.

Évaluation technique d'Oticon Intent

Pour évaluer les performances d'Oticon Intent, nous avons procédé à une évaluation technique systématique et nous l'avons comparée à notre appareil haut de gamme existant, Oticon Real. L'objectif principal était d'évaluer la capacité de l'aide auditive à fournir un soutien auditif pour la parole dans des situations d'écoute complexes. Pour cela, nous avons mis en place une procédure de test contrôlée dans un studio sonore traité acoustiquement, dans lequel nous avons simulé une conversation intime. Un simulateur de tête et de torse (HATS) a été positionné au centre de la pièce, à 1,6 mètre d'un haut-parleur (0°) reproduisant un signal vocal cible. De plus, deux haut-parleurs ont été placés à 100° et 260°, comme illustré à la figure 6, et servaient de masqueurs. Les haut-parleurs masquants présentaient des locuteurs interférents mélangés à un bruit stationnaire en forme de parole (SSN). La cible était diffusée en continu à 65 dB SPL, tandis que le son des masques variait de 50 à 75 dB SPL. Cela nous a permis d'explorer une gamme de scénarios d'écoute allant de très simple à très complexe.

Nous avons enregistré des signaux de parole dans le bruit à l'aide du HATS portant Oticon Intent ou Oticon Real. Nous avons utilisé des micro-embouts fermés installés sur le conduit auditif du HATS pour minimiser les interférences provenant des sons non traités par l'aide

auditive. Les deux aides auditives ont été ajustées pour compenser une perte auditive modérée sur la base de l'audiogramme standard N3 (Bisgaard et coll., 2010), pour un adulte ayant une expérience à long terme définie dans Genie 2. Toutes les fonctionnalités ont été maintenues à leur configuration par défaut, à l'exception de la gestion du Larsen et du de la communication binaurale, qui ont été désactivées. Cela était nécessaire en raison des méthodes d'enregistrement hautement spécialisées utilisées et discutées ci-dessous. De plus, une amplification linéaire a été utilisée pour s'assurer que les résultats reflètent uniquement l'effet de MSI. Nous avons examiné les enregistrements de HATS afin d'évaluer les performances des aides auditives en ce qui concerne les éléments suivants :

Soutien d'écoute dans le bruit : Nous avons utilisé des mesures du RSB de sortie pour quantifier le contraste créé entre la parole et le bruit afin d'évaluer l'efficacité de l'aide auditive en matière d'amélioration de la clarté de la parole et de réduction du bruit perturbateur.

Accès aux indices vocaux : Nous avons utilisé une métrique objective d'intelligibilité de la parole pour quantifier l'accès aux signaux vocaux et l'analyse du spectrogramme pour examiner la capacité de l'aide auditive à préserver les détails de la parole en présence de bruit.

Adaptation accrue du soutien aux besoins d'écoute individuels

Équipé de la technologie de capteurs 4D, Oticon Intent peut désormais répondre aux besoins d'écoute de l'utilisateur dans une gamme plus large de situations d'écoute, en offrant un contraste plus prononcé entre les signaux désirables et le bruit de fond. Nous avons évalué cette amélioration à l'aide de mesures du RSB en sortie. Le RSB en sortie a été calculé à l'aide de la méthode d'inversion de phase par Hagerman & Olofsson (2004). Le RSB a ensuite été pondéré sur toutes les bandes de fréquences à l'aide des pondérations de l'indice d'intelligibilité de la parole (Speech Intelligibility Index, ANSI S3.5, 1997) correspondant à la fréquence centrale de chaque bande avant de calculer le RSB en sortie.

Le RSB en sortie a été mesuré pour Oticon Intent avec la technologie de capteurs 4D activée et désactivée, ainsi que pour l'appareil haut de gamme de génération

précédente, Oticon Real. La figure 4 illustre l'amélioration du RSB en sortie pour divers niveaux de RSB en entrée, représentant différentes complexités dans l'environnement d'écoute. Les résultats démontrent qu'Oticon Intent offre un soutien supérieur aux utilisateurs, avec une amélioration du RSB en sortie allant jusqu'à 5 dB par rapport à Oticon Real lors d'une conversation intime dans un environnement d'écoute bruyant. Lorsque la technologie de capteurs 4D est désactivée, une amélioration allant jusqu'à 1,5 dB (obtenue en comparant la courbe bleue en pointillés et la courbe grise en pointillés sur la figure 4) est principalement attribuée à la mise à jour du RNP 2.0 sur la nouvelle plateforme Sirius. Les résultats présentés à la figure 4 soulignent également qu'Oticon Intent avec la technologie de capteurs 4D activée offre une plus grande adaptation du soutien allant jusqu'à 5 dB d'amélioration du RSB en sortie en fonction de l'intention d'écoute de l'utilisateur. Un RSB en sortie plus élevé indique une meilleure clarté de la parole, tandis qu'un RSB en sortie plus faible permet un meilleur accès aux sons environnants. Par conséquent, Oticon Intent peut toujours fournir aux utilisateurs le niveau approprié de soutien et d'accès aux sons environnants dans le même environnement d'écoute, qu'ils soient engagés dans une conversation intime ou qu'ils se déplacent dans la pièce. Examinons maintenant en détail les résultats obtenus avec un RSB en entrée de 0 dB sur la figure 4. Dans cette

situation d'écoute difficile, où l'intensité du signal vocal cible est égale à celle du bruit de fond, Oticon Intent a surpassé les performances d'Oticon Real. Ceci est illustré à la figure 7, où il est démontré que le rapport signal/bruit de sortie d'Oticon Intent est supérieur de 5 dB à celui d'Oticon Real lorsque la technologie de capteurs 4D est activée et de 1,5 dB lorsqu'elle est désactivée. Ces résultats soulignent qu'Oticon Intent excelle lorsqu'il s'agit de faire ressortir le signal cible du bruit de fond, et représente une amélioration de la clarté de la parole qui améliore considérablement la capacité de compréhension de la parole de l'utilisateur. (Bianchi/Eskelund et coll., 2024).

Plus d'accès aux indices de parole pour une meilleure compréhension de la parole

Nous avons utilisé l'indice d'intelligibilité de la parole (SII) (ANSI S3.5, 1997) pour évaluer l'impact des améliorations du RSB en sortie sur l'intelligibilité de la parole. Le SII est une mesure de l'intelligibilité prédite de la parole qui estime le degré auquel la parole peut être comprise en tenant compte de l'audibilité du signal vocal. Le SII est dérivé de facteurs de pondération tels que la clarté du signal vocal, la présence de bruit de fond et la capacité auditive de l'auditeur. Une valeur SII plus élevée indique un accès accru aux indices vocaux, ce qui indique une plus grande chance d'intelligibilité.

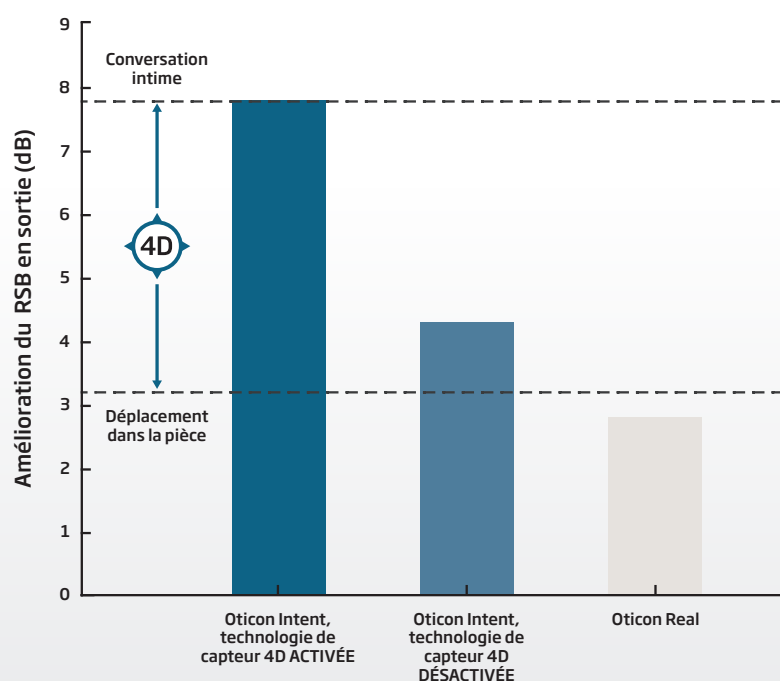


Figure 7. Amélioration du RSB en sortie mesurée avec un RSB en entrée de 0 dB pour Oticon Intent avec la technologie de capteurs 4D activée et désactivée, et pour Oticon Real.

La figure 8 montre le SII en % calculé à un rapport signal bruit en entrée de 0 dB pour Oticon Real et Oticon Intent avec la technologie de capteurs 4D activée et désactivée. Les résultats montrent des valeurs SII pour Oticon Intent de 58 % lorsque la technologie de capteurs 4D est activée et de 48 % lorsqu'elle est désactivée. À titre de comparaison, le SII calculé pour une personne ayant des seuils auditifs normaux sans aides auditives atteindrait seulement une valeur de 40 % dans la même situation difficile. Par rapport à Oticon Real, les valeurs SII obtenues pour Oticon Intent représentent une augmentation relative substantielle de 35 % du SII avec la technologie de capteurs 4D activée et une augmentation de 12 % du SII avec la technologie de capteurs 4D désactivée. Dans l'ensemble, ces résultats démontrent qu'Oticon Intent offre un accès supérieur aux indices de parole par rapport à Oticon Real, améliorant la capacité de l'utilisateur à comprendre la communication verbale et à communiquer plus efficacement. Cela conduit à une expérience d'écoute globale améliorée, même dans des environnements difficiles.

Meilleure clarté de la parole et amélioration des détails de la parole

Pour assurer un soutien optimal à la compréhension de la parole, il est essentiel que les aides auditives capturent et préservent avec précision tous les détails du signal vocal. Ce processus peut être étudié à l'aide d'un spectrogramme, qui fournit une analyse détaillée des

enregistrements d'aides auditives en termes de temps et de fréquence. Représenté couramment sous la forme d'une carte thermique, le spectrogramme illustre la distribution de la puissance sonore (en dB) par fréquence (sur l'axe vertical) dans le temps (sur l'axe horizontal). Sur le spectrogramme, l'amplitude de la puissance sonore est représentée par des variations de luminosité. Les régions sombres indiquent une faible puissance sonore (zones calmes) et les régions lumineuses indiquent une puissance sonore élevée (zones de niveau fort).

Nous avons effectué une analyse spectrographique pour une scène très exigeante : une conversation intime en présence de bruits et de locuteurs concurrents à un RSB de 0 dB. Ici, nous voulions comparer la capacité à préserver les détails de la parole d'Oticon Intent et d'Oticon Real. La figure 9 affiche le spectrogramme d'une phrase dans le bruit, enregistrée à la sortie d'Oticon Real (panneau A) et d'Oticon Intent avec la technologie de capteurs 4D activée (panneau B), comme le montre la configuration expérimentale illustrée à la figure 7. Les deux aides auditives ont été programmées en utilisant les paramètres de prescription par défaut. Lors de la comparaison des spectrogrammes, on peut observer qu'Oticon Intent fournit une plus grande réduction du bruit, car davantage de zones sombres sont visibles dans le spectrogramme entre les éléments vocaux sur toute l'étendue fréquentielle.

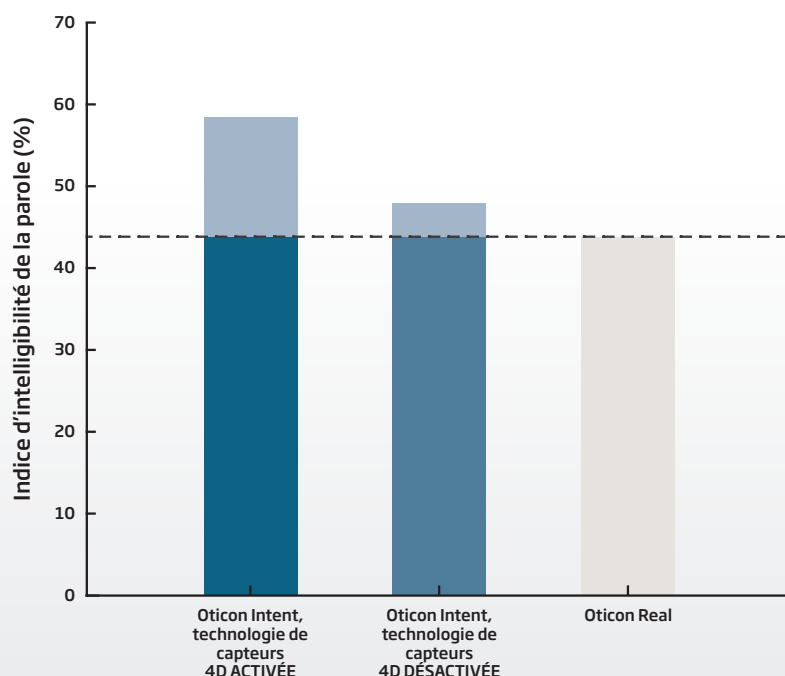


Figure 8. Indice d'intelligibilité de la parole mesuré avec un RSB en entrée de 0 dB pour Oticon Intent avec la technologie de capteurs 4D activée et désactivée, et pour Oticon Real.

De plus, le signal vocal peut être identifié plus clairement dans le spectrogramme obtenu pour Oticon Intent. Notez par exemple la représentation plus fine et plus précise des harmoniques de la voyelle « a » et une meilleure préservation du son contenu en fréquence pour Intent dans le panneau B. Ainsi, Oticon Intent préserve mieux les détails de la parole tout en réduisant davantage le bruit de fond qu'Oticon Real, offrant ainsi aux utilisateurs une meilleure clarté de la parole.

Test du RNP mis à niveau

Enfin, nous avons mis à l'épreuve le RNP N 2.0, une innovation remarquable d'Oticon Intent. Pour effectuer une évaluation équitable entre le RNP 2.0 et la génération précédente RNP 1.0, nous avons isolé leurs effets en simulant leur traitement sonore à l'aide d'un RSB en entrée de 0 dB. La figure 10 présente des spectrogrammes illustrant la parole pure (panneau A) et la parole dans le bruit (panneau B) traitées par l'aide auditive uniquement avec le gain (MSI désactivé). Les régions

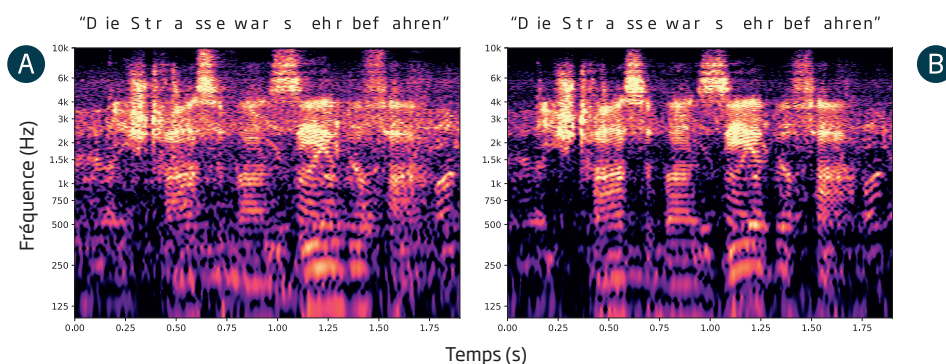


Figure 9. Spectrogramme de la phrase allemande « Die Strasse war sehr befahren » (« La route était très fréquentée ») enregistrée avec un RSB en entrée de 0 dB pour Oticon Real (panneau A) et Oticon Intent avec la technologie de capteurs 4D (panneau B). Les régions sombres indiquent une faible puissance sonore (zones calmes) et les régions lumineuses indiquent une puissance sonore élevée (zones de niveau élevé).

sombres indiquent une faible puissance sonore (zones calmes) et les régions lumineuses indiquent une puissance sonore élevée (zones de niveau élevé) comme à la figure 9. La partie inférieure de la figure 10 montre comment les deux versions du RNP traitent différentes zones du signal vocal dans le bruit lorsque la suppression neuronale du bruit est activée. Les zones atténuées (zones rouges), préservées (zones blanches) et améliorées (zones bleues) sont illustrées pour le RNP 1.0 dans Oticon Real (Panneau C) et pour le RNP 2.0 dans Oticon Intent (Panneau D).

La comparaison entre Oticon Real et Oticon Intent révèle des différences en termes de capacités de suppression du bruit. Le spectrogramme pour le RNP 1.0 dans Oticon Real (Panneau C) montre que la suppression du bruit est plus limitée au-delà de 7,5-8 kHz que dans Oticon Intent (Panneau D). Le contraste créé entre la parole et le bruit est également plus important avec le RNP 2.0 dans Oticon Intent qu'avec le RNP 1.0 dans Oticon Real : sur la même échelle, des zones bleues plus foncées et rouges plus foncées sont visibles dans le panneau D par rapport au panneau C. De plus, certaines zones contenant des informations vocales ne sont pas

entièrement améliorées avec le RNP 1.0, tandis que le RNP 2.0 s'avère plus efficace pour préserver les détails de la parole sur toute l'étendue fréquentielle. Par conséquent, le spectrogramme d'Intent dans le panneau D reflète plus fidèlement le spectrogramme de parole pure du panneau A. Par exemple, voyez comment la voyelle « a » présente une amélioration plus cohérente de tout son spectre et la consonne « s » est améliorée dans des fréquences plus élevées sur le panneau D que sur le panneau C. Dans l'ensemble, le RNP 2.0 offre donc un meilleur contraste entre la parole et le bruit ainsi qu'une amélioration plus précise des détails de la parole.

Conclusion

Ce livre blanc a présenté les deux principales avancées technologiques de MSI 3.0 dans Oticon Intent : la technologie de capteurs 4D et le RNP 2.0. La technologie de capteurs 4D offre à l'utilisateur un soutien mieux personnalisé en fonction de ses besoins d'écoute dans une situation d'écoute donnée. Le RNP 2.0 offre un meilleur contraste entre le signal cible et le bruit de fond dans le paysage sonore et une meilleure amélioration des détails de la parole.

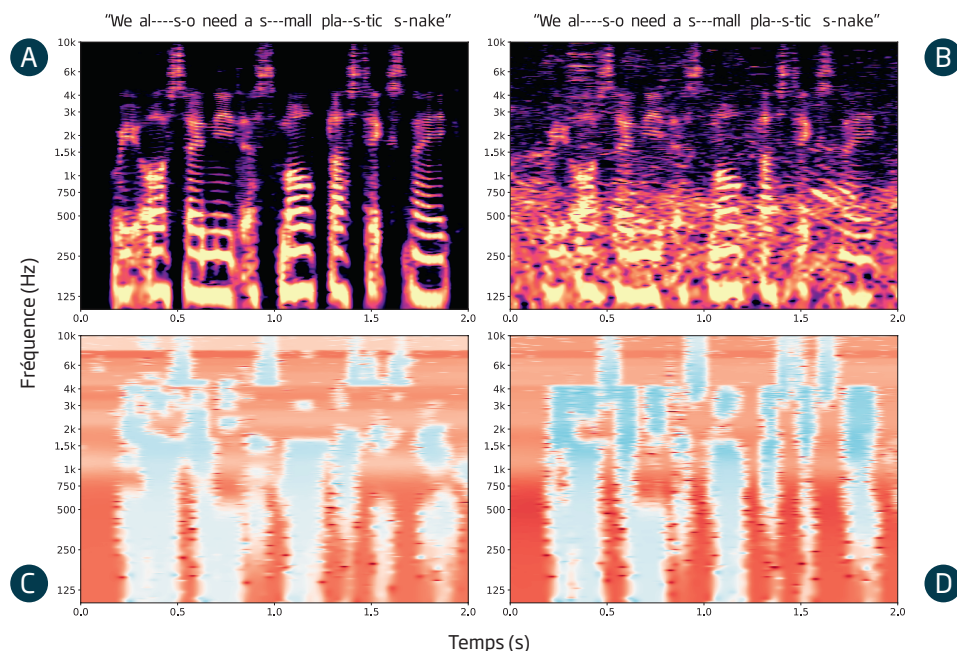


Figure 10. Spectrogramme de la phrase anglaise « We also need a small plastic snake » simulée pour un RSB en entrée de 0 dB. Le panneau A présente le spectrogramme du signal de parole pure. Le panneau B montre le spectrogramme du même signal vocal dans un bruit de babillage traité par l'aide auditive sans réduction du bruit. Les panneaux C et D montrent le contraste entre la parole et le bruit créé par le RNP 1.0 (C) et le RNP 2.0 (D) pour le signal bruité montré dans le panneau B. Dans les panneaux A et B, les régions sombres indiquent une faible puissance sonore (zones calmes) et les régions lumineuses indiquent une puissance sonore élevée (zones à fort niveau). Les panneaux C et D montrent les zones de fréquence/temps atténuées (zones rouges), préservées (zones blanches) et améliorées (zones bleues) par le RNP 1.0 et le RNP 2.0, respectivement.

Les résultats d'une évaluation technique ont clairement montré qu'Oticon Intent est plus performant qu'Oticon Real :

Oticon Intent et sa technologie de capteurs 4D offrent une adaptation du soutien allant jusqu'à 5 dB d'amélioration du RSB en sortie dans le même environnement sonore en fonction de l'intention d'écoute de l'utilisateur.

Oticon Intent fournit jusqu'à 1,5 dB de RSB en sortie supplémentaire par rapport à Oticon Real avec la plateforme Sirius et le RNP 2.0, et une augmentation de 5 dB du RSB en sortie avec l'ajout de la technologie de capteurs 4D. Par conséquent, Oticon Intent offre aux utilisateurs une meilleure clarté de la parole et plus de contraste entre la parole et le bruit de fond.

- Oticon Intent apporte 35 % d'accès aux signaux vocaux en plus par rapport à Oticon Real, offrant aux utilisateurs des scènes sonores plus claires dans lesquelles les détails de la parole sont mieux préservés et davantage de bruit de fond est atténué.

Offrant maintenant un soutien personnalisé supplémentaire dans chaque scène sonore, ces avantages techniques permettent aux utilisateurs de se concentrer plus facilement sur la tâche qui les intéresse, comme le prouvent les nombreux avantages de BrainHearing observés dans les études cliniques impliquant des utilisateurs d'aides auditives (Bianchi/Eskelund et coll., 2024 ; Andersen et coll., 2021 ; Alickovic et coll., 2021).

Références

1. Akeroyd, M. A. (2014). An Overview of the Major Phenomena of the Localization of Sound Sources by Normal-Hearing, Hearing-Impaired, and Aided Listeners. *Trends in Hearing* Vol. 18, pp. 1-7.
2. Alickovic, E., Ng, E. H. N., Fiedler, L., Santurette, S., Innes-Brown, H. et Graversen, C. (2021). Effects of hearing aid noise reduction on early and late cortical representations of competing talkers in noise. *Frontiers in neuroscience*, 15, 636060.
3. Andersen, A. H., Santurette, S., Pedersen, M. S., Alickovic, E., Fiedler, L., Jensen, J., & Behrens, T. (2021). Creating clarity in noisy environments by using deep learning in hearing aids. *Seminars in Hearing* 42(3), 260-281.
4. ANSI S3.5. (1997). American national standards methods for the calculation of the articulation index. American National Standards Institute.
5. Bianchi, F./Eskelund, K., Zapata-Rodriguez, V., Sanchez Lopez, R. et Gade, P. (2024). Oticon Intent™ - Preuves cliniques. BrainHearing™ benefits of the 4D Sensor Technology. Livre blanc d'Oticon.
6. Bisgaard, N., Vlaming, M. S. et Dahquist, M. (2010). Standard audiograms for the IEC 60118-15 measurement procedure. *Trends in Amplification*, 14(2), 113-120. doi:10.1177/1084713810379609
7. Brændgaard, M. (2020). An introduction to MoreSound Intelligence™. Document technique d'Oticon.
8. Gade, P.A., Brændgaard, M., Flocken, H., Preszcat, D. et Santurette, S. (2023). Wind & Handling Stabilizer - Evidence and user benefits. Improved wind and handling noise removal for better clarity. Livre blanc d'Oticon.
9. Hadley, L. V., Brimijoin, W. O. et Whitmer, W. M. (2019). Speech, movement, and gaze behaviours during dyadic conversation in noise. *Scientific reports*, 9(1), 1-8.
10. Hadley, L. V., Whitmer, W. M., Brimijoin, W. O. et Naylor, G. (2020). Conversation in small groups: Speaking and listening strategies depend on the complexities of the environment and group. *Psychonomic Bulletin & Review*, 28(2), 632-640.
11. Hadley, L. V. et Culling, J. F. (2022). Timing of head turns to upcoming talkers in triadic conversation: Evidence for prediction of turn ends and interruptions. *Frontiers in Psychology*, 13.
12. Hagerman, B., et Olofsson, Å. (2004). A method to measure the effect of noise reduction algorithms using simultaneous speech and noise. *Acta Acustica United with Acustica*, 90(2), 356-361.
13. Higgins, N. C., Pupo, D. A., Ozmeral, E. J. et Eddins, D. A. (2023). Head movement and its relation to hearing. *Frontiers in Psychology*, 14.
14. Picou, E. M. (2020). *Les résultats de l'enquête MarkeTrak 10 (MT10) démontrent une grande satisfaction et des avantages des aides auditives. In *Seminars in hearing* (Vol. 41, N° 01, pp. 021-036). Thieme Medical Publishers.
15. Santurette, S., et Laugesen, S. (2023). Audible Contrast Threshold (ACT™). A language-independent diagnostic test to quantify real-life speech-in-noise ability and personalise help-in-noise settings in hearing aids. Livre blanc d'Oticon.

Life-changing technology signifie
Des technologies qui changent la vie.

www.oticon.fr

Oticon est une marque du groupe Demant.

oticon
life-changing **technology**