

# ORL Mag 94

ORGANE OFFICIEL D'EXPRESSION DES **INSTANCES NATIONALES**  
DE L'ORL ET DE LA CHIRURGIE CERVICO-FACIALE

DÉCEMBRE 2022

## SFORL

Prix Posters Congrès SFORL 2022 / Bourses de la SFORL 2022.....p 14 /16

Rapport des ateliers de simulation lors du Congrès à Marseille.....p 18

## CAS CLINIQUE

**Audiomètre tonale automatisé** p 32  
N. WALLAERT, H. JEAN, N. PARAOUTY

**Se former à éviter  
un Rio-Paris chirurgical** p 35

B. CADRE, G. DUBEY, O. CIACIO,  
F. DENOYELLE, B. THIERRY, F. SIMON



*TOUTE l'ÉQUIPE D'ORL MAG  
VOUS SOUHAITE  
UNE BONNE ANNÉE 2023*

## Audiométrie tonale automatisée : en quoi l'Intelligence Artificielle pourrait-elle bien la révolutionner ?

Nicolas Wallaert<sup>1,2</sup>, Hadrien Jean<sup>1,3</sup>, Nihaad Paraouty<sup>1,4</sup>

1. iAudiogram, 5 Bis Cours Anatole France, 51100 Reims, France

2. Audioprothésiste D.E., Master Audiologie et Troubles du Langage, Ingénieur en Acoustique, Docteur en Sciences Cognitives (PhD), Membre du Collège National d'Audioprothèse

3. Data scientist, Machine learning scientist, Docteur en Sciences Cognitives (PhD)

4. Translational auditory scientist, Docteur en Sciences Cognitives (PhD)

### RÉSUMÉ

L'audiométrie automatisée, une nouveauté, dites-vous ? Oui et non ! En effet, l'audiométrie automatisée existe depuis près d'un siècle, initiée initialement par feu Bekesy dans les années 40. Toutefois, malgré différents protocoles et différentes approches, elle n'a jamais été adoptée pour de nombreuses raisons par les cliniciens (durée des tests non compatible avec une pratique clinique, test facilement biaisable par un simulateur, aucun contrôle par le praticien sur la fiabilité des réponses données par le patient, pas de conduction osseuse ...). Cet article détaille les raisons probables de ce désamour, et montre en quoi les récents progrès des dernières années dans le monde de l'informatique, de la psychoacoustique et de l'intelligence artificielle pourraient bien très sensiblement revoir la donne. Dans un contexte où le temps médical est compté (démographie ORL déclinante et répartition inhomogène au sein du territoire des praticiens), l'audiométrie automatisée par Intelligence Artificielle pourrait bien être l'un des éléments de réponses à proposer pour nous permettre d'accueillir plus de patients, et favoriser ainsi l'accès à une expertise médicale et otologique.

### L'audiométrie tonale automatisée : est-ce réellement nouveau? Pourquoi n'a-t-elle jamais été adoptée?

L'audiométrie tonale et vocale demeurent les éléments de référence des explorations fonctionnelles de l'audition depuis plusieurs décennies. L'audiométrie tonale, quotidiennement utilisée en pratique clinique courante par chacun d'entre nous, consiste en une estimation du seuil de détection de sons purs en fonction de la fréquence présentés dans le silence.

Au XIXe siècle, cette mesure des seuils auditifs liminaires était réalisée à l'aide de diapasons calibrés de fréquence donnée. L'apparition de l'électronique aura permis de générer un panel infini de sons, en choisissant précisément sa fréquence et son niveau d'intensité, élargissant alors considérablement le champ des explorations fonctionnelles auditives.

De nombreuses procédures différentes ont été proposées pour le recueil des seuils auditifs liminaires. La procédure couramment utilisée en clinique pour l'estimation de l'audiogramme se base sur la procédure modifiée de Hughson-Westlake (Hughson & Westlake, 1944), qui est considérée comme la procédure de référence depuis des années (Carhart & Jerger, 1959).

Comme détaillé par l'American National Standards Institute, la mesure est réalisée fréquence par fréquence. Lors du démarrage du test, le premier son est délivré à un niveau audible pour l'auditeur, et le niveau est réduit par incréments fixes jusqu'à ce que l'auditeur ne réponde plus. L'intensité est ensuite augmentée par un plus petit incrément jusqu'à ce que l'auditeur réponde à nouveau. Cette procédure est répétée pour plusieurs « inversions » (Franks, 2001; ANSI, 2004; American Speech-Language-Hearing Association, 2021).

Parallèlement aux mesures des seuils liminaires conventionnelles, des méthodes d'audiométrie automatisée ont fait leur

apparition en clinique pour la première fois avec les travaux de Georg von Bekesy à la fin des années 1940 (Bekesy, 1947). Dans cette méthode, la fréquence du signal est ajustée de façon continue de façon croissante ou décroissante. Le niveau de présentation du signal est ajusté à la baisse lorsque le patient appuie sur le bouton pour signaler qu'il entend, et à la hausse lorsqu'il relâche. Cette procédure combine l'avantage d'utiliser une mesure continue en fréquence et en intensité. Elle est toutefois limitée par le temps de réaction du patient afin de déterminer s'il entend ou non le son, ainsi que par la durée de réalisation des tests (Fastl & Zwicker, 2007).

Plus récemment, de nombreux algorithmes ont été conçus pour automatiser le recueil des données audiométriques, la plupart utilisant une procédure inspirée du protocole de Hughson-Westlake (e.g., Ho et al., 2009; Margolis et al., 2010; Swanepoel et al., 2010; Mahomed et al., 2013). En pratique clinique, l'audiométrie automatisée informatisée est relativement peu utilisée dans les contextes de diagnostic clinique, la plupart des audiogrammes étant encore réalisés manuellement (Vogel et al., 2007).

Pendant, dans la pratique clinique quotidienne et tout spécialement dans le contexte actuel en France, le temps médical est une denrée limitée. En conjuguant la sous-démographie médicale proche des ORL, la forte demande de soins otologiques liée à l'évolution démographique et à la mise en place de la Loi 100% Santé, l'accès à un otologiste pourrait constituer un enjeu majeur de santé publique dans les prochaines années. Le temps médical disponible constitue donc un facteur clé limitant, imposant des choix.

Par conséquent, l'estimation manuelle des seuils auditifs liminaires est donc réalisée uniquement sur un nombre limité de fréquences, et parfois pour un seul mode de transduction (conduction aérienne (CA), sans conduction osseuse (CO)).

Toutefois, une mesure trop épars des seuils auditifs conduit à un diagnostic imprécis et partiel, notamment en raison d'une méconnaissance de l'intégrité de l'audition sur les fréquences non testées. Ce dernier point est particulièrement problématique dans le diagnostic de pertes auditives localisées en fréquence, de la prise en charge de patients acouphéniques, de pertes auditives cachées, ou dans l'ajustement des aides auditives ou d'implants pour lesquels les canaux de réglages ne correspondent pas forcément aux fréquences audiométriques usuelles. Pour prévenir cet écueil, les normes et recommandations des sociétés savantes (e.g., ANSI, 2004; British Society of Audiology, 2018) recommandent de mesurer les seuils auditifs liminaires sur une à deux fréquences par octave, et d'ajuster le niveau de présentation par pas de 5 dB, limitant les possibilités de gain de temps.

Aussi, le recours à une automatisation de l'audiométrie va devenir une nécessité. Des revues exhaustives et des méta-analyses sur les différentes techniques d'audiométries automatisées disponibles ont été présentées dans Mahomed et al., 2013 (revues des méthodes développées avant 2012) et dans Wassman et al., 2022 (revues des méthodes post 2012). En effet, un large éventail de protocoles automatisés peuvent produire des audiogrammes généralement comparables aux audiogrammes manuels, avec une différence absolue moyenne de 4,2 dB HL et un écart type de 5,0 dB HL (Mahomed et al., 2013; résultats de 4 études combinées, n=360). La répétabilité entre des méthodes automatisées a démontré une valeur absolue moyenne de 2,9 dB HL et un écart type de 3,8 dB HL (test-retest, Mahomed et al., 2013; résultats de 2 études combinées, n=80). À titre de comparaison, une différence absolue moyenne de 3,2 dB HL et un écart type de 3,9 dB HL ont été mesurés pour l'audiométrie tonale liminaire (Mahomed et al., 2013; résultats de 2 études combinées, n=80). Ces études indiquent que l'automatisation de l'audiométrie fournit des seuils liminaires comparables en valeur et en termes de répétabilité comparativement aux procédures manuelles conventionnelles.

Les techniques adaptatives, telles que celles décrites dans Mahomed et al. (2013) et par la procédure de Hughson-Westlake elle-même, partagent la caractéristique commune de faire varier systématiquement l'intensité du son test à une fréquence donnée jusqu'à ce qu'une valeur seuil pour chacune des fréquences échantillonnées soit déterminée. Cette approche présente toutefois différents inconvénients:

- (1) pour chaque fréquence audiométrique, il est nécessaire de tester différents stimuli parfois très éloignés du seuil (probabilités de détection très élevées ou très faibles) pour obtenir un seul point, ce qui semble **non efficient**;
- (2) la détermination du seuil audiométrique étant réalisée par encadrement, l'obtention d'un seuil précis **impose de multiplier les tests avec des stimuli identiques ou presque identiques à plusieurs reprises** à proximité du seuil;
- (3) **les séquences de présentation de stimulus ont un grand degré de prévisibilité** (même fréquence testée plusieurs fois, et variation de l'intensité prévisible), ce qui augmente sensiblement le risque de fausse alarme (patient croit entendre) ou

les possibilités de manipulation des résultats par des auditeurs non-coopératifs (e.g., simulateurs).

(4) **l'estimation du seuil auditif** du patient est obtenue **de façon discrète en fréquence**, uniquement pour les fréquences audiométriques testées (entre 6 et 11 fréquences) **alors qu'un grand nombre de stimuli ont été présentés aux patients** (environ 30 à 80 stimuli)

(5) **la plupart des systèmes d'audiométrie tonale automatisée ne permettent de réaliser qu'une conduction aérienne sans conduction osseuse**. Le praticien doit donc revenir en cours d'examen pour positionner les transducteurs adéquats, puis réaliser la conduction osseuse et le masquage contrôlé-réal manuellement, limitant l'intérêt de l'automatisation.

(6) **aucun système à l'heure actuelle ne fournit d'intervalle de confiance sur l'estimation du seuil obtenu automatiquement** fréquence par fréquence, ainsi qu'un contrôle a posteriori de l'intégrité des réponses réalisées par le patient. Ces deux paramètres sont pourtant critiques pour **permettre au praticien d'avoir un contrôle a posteriori de la qualité de l'audiométrie réalisée** en son absence et de la confiance qu'il peut y accorder.

La réalisation automatisée mais partielle de l'audiométrie tonale (sans CO) et l'absence de contrôle quant à l'incertitude audiométrique constituent **probablement les principales causes de la très faible utilisation de l'audiométrie tonale automatisée en pratique clinique courante**. De plus, si l'audiométrie tonale a été automatisé, aucun système à l'heure actuelle ne permet de réaliser une audiométrie vocale de façon totalement automatisée avec des listes ouvertes.

### **Vers un renouveau de l'audiométrie automatisée grâce à l'Intelligence Artificielle (IA)?**

Les différentes problématiques évoquées ci-dessous peuvent probablement, à l'aune des travaux scientifiques des dernières années réalisés tant en psychoacoustique que dans le domaine de l'IA, être résolues :

- (1) et (2) **présentation de nombre stimuli ne donnant que peu d'informations sur les seuils du patient** : différents travaux en psychophysiques ont tenté d'optimiser les méthodes d'échantillonnage, c'est-à-dire les méthodes permettant de choisir les points testés de façon à maximiser l'information obtenue pour chaque point (Leek, 2001). Le problème d'échantillonnage optimal peut être adressé par des méthodes dites "bayésiennes" combinées à l'un des sous-domaines de l'IA, que l'on appelle l'apprentissage actif;
- (3) **estimation de l'audition discrète en fréquence** : cet inconvénient peut être contourné en faisant varier constamment la fréquence des stimuli sonores. Cette technique est utilisée par exemple pour l'audiométrie de Bekesy et l'Audioscan (Bekesy, 1947; Meyer-Bisch, 1996; Ishak et al., 2011). Ces techniques tentent d'estimer l'audiogramme de façon continu. L'au-

dioscan présente l'avantage d'être capable d'identifier diverses pathologies auditives qui ne peuvent pas toujours être détectées par une audiométrie conventionnelle pour laquelle seule une estimation discrète des seuils est obtenue (Jerger, 1960; Zhao et al., 2002; 2014). Malgré ces avantages, ces techniques ne sont que très peu utilisées en clinique. La principale raison reste temporelle - le temps d'acquisition des données étant considérablement plus élevé que celui nécessaire pour réaliser une audiométrie conventionnelle (Ishak et al., 2011). De plus, une attention plus élevée de la part du sujet est requise, pouvant conduire à des inexactitudes ou à de fausses déclarations intentionnelles. Ces inconvénients peuvent être dépassés par l'adoption de techniques d'IA. Dans l'idéal, les sons tests doivent être présentés de façon discrète, pour s'affranchir de l'impact du temps de réponse du patient. Toutefois, la mesure en fréquence se doit d'être réalisée de façon continue et le niveau de présentation du signal doit être choisi de façon à être le plus informatif pour la détermination du seuil. En fusionnant les méthodes de classification de Machine Learning avec des techniques d'estimation bayésienne optimale et des procédures d'échantillonnage efficaces issues de la psychophysique, quelques récents travaux (e.g., Schlittenlacher et al., 2018; Cox and de Vries, 2015; Song et al., 2015; Barbour et al., 2019) ont montré la faisabilité d'une telle audiométrie de nouvelle génération.

- (4) **séquences de stimuli prévisibles** : La détermination du prochain point à tester pouvant être réalisée par un algorithme d'IA qui visera à tester le point qui apportera le plus d'information, les stimuli présentés aux patients seront donc nettement moins prévisibles, car la fréquence et l'intensité de chaque stimulus variera d'essai en essai, de façon à converger le plus rapidement possible vers une estimation fiable du seuil auditif. Dans la mesure où cette méthode est moins prévisible pour l'auditeur comparativement à une audiométrie conventionnelle, le démasquage des auditeurs non-coopératifs est plus aisé. Toutefois, la tâche n'est pas plus difficile pour le patient et ne conduit pas à une dégradation globale des seuils (Schlittenlacher et al., 2018).

- (5) **absence de conduction osseuse automatisée** : de récents travaux par **iAudiogram** (brevet en cours) ont permis de lever les principales contraintes (e.g., positionnement des transducteurs, nécessité d'un opérateur extérieur pour le déplacement des casques, masquage controlatéral) qui permettent aujourd'hui de réaliser une audiométrie automatisée par IA, tant en conduction aérienne, qu'en conduction osseuse.

- (6) **mesures de fiabilité des réponses fournies durant l'audiométrie automatisée** : la combinaison de différents algorithmes devrait aujourd'hui permettre d'estimer, fréquence par fréquence, le degré d'incertitude associé à l'estimation du seuil audiométrique. Par ailleurs, le praticien peut évaluer a posteriori en un coup d'œil, si chacune des réponses effectuées par le patient est cohérente comparativement aux seuils audiométriques fournis par l'IA.

Dans un prochain numéro d'ORL Mag, nous détaillerons la méthode utilisée par notre équipe pour le développement de **iAudiogram**, ainsi que les principes de fonctionnement.

Pour plus d'information ou voir concrètement le déroulement des tests automatisés par IA, n'hésitez pas à consulter notre site internet: [www.iaudiogram.com](http://www.iaudiogram.com), ou à vous rendre sur <https://iaudiogram.com/support/#Academy>, pour accéder à de nombreuses informations (vidéos, revues de littératures, webinaires, extraits d'articles scientifiques) au sujet de l'IA en audiologie.



Flashez-moi pour voir le déroulement d'une audiométrie tonale automatisée par IA en vidéo !

## Références

- ANSI/ASA. (2004). Methods for manual pure-tone threshold audiometry (ANSI S3. 21-2004).
- American Speech-Language-Hearing Association. (2021). Guidelines for manual pure-tone threshold audiometry. 2005.
- Barbour, D. L., Howard, R. T., Song, X. D., Metzger, N., Suksan, K. A., DiLorenzo, J. C., ... & Heisey, K. L. (2019). Online machine learning audiometry. *Ear and hearing*, 40(4), 918.
- Békésy, G. V. (1947). A new audiometer. *Acta Oto-Laryngologica*, 35(5-6), 411-422. British Society of Audiology, 2018 (<https://www.thebsa.org.uk/wp-content/uploads/2018/11/OD104-32-Recommended-Procedure-Pure-Tone-Audiometry-August-2018-FINAL.pdf>)
- Carhart, R., & Jerger, J. F. (1959). Preferred method for clinical determination of pure-tone thresholds. *Journal of speech and hearing disorders*, 24(4), 330-345.
- Cox, M., & de Vries, B. (2015). A Bayesian binary classification approach to pure tone audiometry. arXiv preprint arXiv:1511.08670.
- Fasti, H., & Zwicker, E. (2007). Information processing in the auditory system. In *Psychoacoustics* (pp. 23-60). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Franks, J. R. (2001). Hearing measurement. Occupational exposure to noise: evaluation, prevention and control. Geneva: World Health Organisation, 183-231.
- Ho, A. T., Hildreth, A. J., & Lindsey, L. (2009). Computer-assisted audiometry versus manual audiometry. *Otology & Neurotology*, 30(7), 876-883.
- Hughson, W., & Westlake, H. D. (1944). Manual for program outline for rehabilitation of aural casualties both military and civilian: sponsored by the American Academy of Ophthalmology and Otolaryngology. Douglas Print Company.
- Ishak, W. S., Zhao, F., Stephens, D., Culling, J., Bai, Z., & Meyer-Bisch, C. (2011). Test-retest reliability and validity of Audiocan and Békésy compared with pure tone audiometry. *Audiological Medicine*, 9(1), 40-46.
- Jerger, J. (1960). Békésy audiometry in analysis of auditory disorders. *Journal of Speech and Hearing Research*, 3(3), 275-287.
- Leek, M. R. (2001). Adaptive procedures in psychophysical research. *Perception & psychophysics*, 63(6), 1279-1292.
- Mahomed, F., Swanepoel, D. W., Eikelboom, R. H., & Soer, M. (2013). Validity of automated threshold audiometry: a systematic review and meta-analysis. *Ear and hearing*, 34(6), 745-752.
- Margolis, R. H., Glasberg, B. R., Creeke, S., & Moore, B. C. (2010). AMTAS™: Automated method for testing auditory sensitivity: Validation studies. *International journal of audiology*, 49(3), 185-194.
- Meyer-Bisch, C. (1996). Audiocan: a high-definition audiometry technique based on constant-level frequency sweeps-A new method with new hearing indicators. *Audiology*, 35(2), 63-72.
- Schlittenlacher, J., Turner, R. E., & Moore, B. C. (2018). Audiogram estimation using Bayesian active learning. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 144(1), 421-430.
- Song, X. D., Wallace, B. M., Gardner, J. R., Ledbetter, N. M., Weinberger, K. Q., & Barbour, D. L. (2015). Fast, continuous audiogram estimation using machine learning. *Ear and hearing*, 36(6), e236.
- Swanepoel, D. W., Mngemane, S., Molemong, S., Mkwanzai, H., & Tutshini, S. (2010). Hearing assessment—reliability, accuracy, and efficiency of automated audiometry. *Telemedicine and e-Health*, 16(5), 557-563.
- Vogel, D. A., McCarthy, P. A., Pratt, G. W., & Brewer, C. (2007). The clinical audiogram: its history and current use. *Commun Disord Rev*, 1(2), 81-94.
- Wasmann, J. W., Pragt, L., Eikelboom, R., & Swanepoel, D. W. (2022). Digital approaches to automated and machine learning assessments of hearing: scoping review. *Journal of medical Internet research*, 24(2), e32581.
- Zhao, F., Stephens, D., & Meyer-Bisch, C. (2002). The audiocan: a high frequency resolution audiometric technique and its clinical applications. *Clinical Otolaryngology & Allied Sciences*, 27(1), 4-10.
- Zhao, F., Stephens, S. D. G., Ishak, W. S., & Meyer-Bisch, C. (2014). The characteristics of Audiocan and DPOAE measures in tinnitus patients with normal hearing thresholds. *International journal of audiology*, 53(5), 309-317.