

Le son 3D comme interface homme/machine en milieu aéronautique

**Louis-Ferdinand Pardo, Serge Ficheux
Guillaume Andéol, David Sarafian,
Lionel Pellieux, Corinne Roumes**
Institut de recherche biomédicale des Armées (IRBA)
Base Aérienne 217
BP 73
91223 Brétigny sur Orge
E-mail : gandeol@imassa.fr

Anne Guillaume
Laboratoire d'accidentologie et de biomécanique
(LAB)
132, rue des Suisses
92000 Nanterre

Résumé

Le son 3D est une technologie visant à restituer sous casque les indices acoustiques de localisation pour recréer un espace sonore virtuel. Cette technologie est en cours d'introduction au sein des interfaces homme/machine en aéronautique civile et militaire pour faciliter la gestion des alarmes et des communications radios. Après un rappel sur les indices physiques permettant la localisation auditive, la technologie son 3D et ses applications sont présentées. Enfin, les aspects liés aux contraintes perceptives de l'auditeur sont évoqués au travers d'études récentes menées dans le milieu de la recherche de défense française.

Abstract

3D sound aims to reproduce, in the headset, the acoustic localization cues to re create a virtual auditory space. This technology is being introduced in the human/system interfaces in civil and military aeronautics environments to facilitate warning systems and radio communication management. After reminding the acoustic cues involved in sound localization, we introduce 3D sound and its applications. Finally, we mention recent studies in French defense research about listener perception issues.

Les pilotes d'avions militaires comme les autres opérateurs de systèmes complexes gèrent une multitude d'interfaces pour acquérir l'information nécessaire à une conduite sûre et efficace de leurs missions. La technologie son 3D¹ vise à faciliter ces interfaces homme/machine en spatialisant les informations auditives présentées dans le casque des opérateurs. Cette technologie permet de recréer un environnement sonore virtuel en reproduisant les indices acoustiques utilisés par notre cerveau pour localiser une source sonore. Il est dès lors possible de redonner à l'opérateur le plein usage de son audition spatiale pour l'aider à localiser une cible, interpréter une alarme, gérer ses communications radio, voir l'aider à s'orienter. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de prendre en compte une somme de contraintes techniques et perceptives. Dans une première partie, nous présentons les indices acoustiques de localisation avant de montrer comment ils peuvent être capturés puis reproduits pour créer le son 3D. Les principales applications du son 3D en environnement aéronautique sont ensuite exposées. Enfin nous nous focaliserons sur les récents travaux menés sur le son 3D dans la recherche de défense en France.

La localisation auditive

La localisation d'une source sonore repose sur l'intégration par notre cerveau de plusieurs types d'indices acoustiques. On distingue les indices binauraux, utilisés pour déterminer l'azimut de la source sonore (angle dans le plan horizontal²), les indices spectraux pour l'élévation (angle dans le plan vertical) et la distinction avant/arrière, et les indices dynamiques pour la distinction avant/arrière.

Les indices binauraux

Les indices binauraux permettent de déterminer l'azimut de la source sonore. Ils proviennent de l'interaction entre l'onde acoustique émise par la source sonore et la tête de l'auditeur. Pour des sons hautes fréquences, la longueur d'onde est petite par rapport à la tête qui agit comme un obstacle absorbant une partie de l'énergie sonore et produisant un effet « d'ombre acoustique » : l'intensité sonore est alors plus importante au niveau de l'oreille la plus proche de la source qu'au niveau de l'oreille la plus éloignée d'où une différence interaurale d'intensité (DII). L'effet d'ombre acoustique diminue avec la fréquence : par exemple, pour une position de la source sur l'axe interaural (droite passant par les 2 oreilles), la DII est d'environ 35 dB à 10 kHz et de 10 dB à 3 kHz [1]. Aux alentours de 1,5 kHz, la longueur d'onde est suffisamment grande par rapport à la tête pour la contourner, et les DII deviennent négligeables.

1-Le terme son 3D est quelquefois associé à d'autres technologies (Nicol et al, 2008), par exemple les systèmes multi haut-parleurs du home cinéma. Dans cet article nous nous limiterons au son 3D sous casque, également appelé technologie « binaurale » ou « synthèse binaurale ».

2-L'azimut est classiquement défini comme l'angle dans le plan horizontal, variant de 0 à 360°. Cependant les indices binauraux étant identiques que la source soit devant ou derrière, l'azimut s'entend comme l'angle de la source avec le plan sagittal, il varie de -90° (directement à gauche) à +90° (directement à droite). Il est indépendant de la position

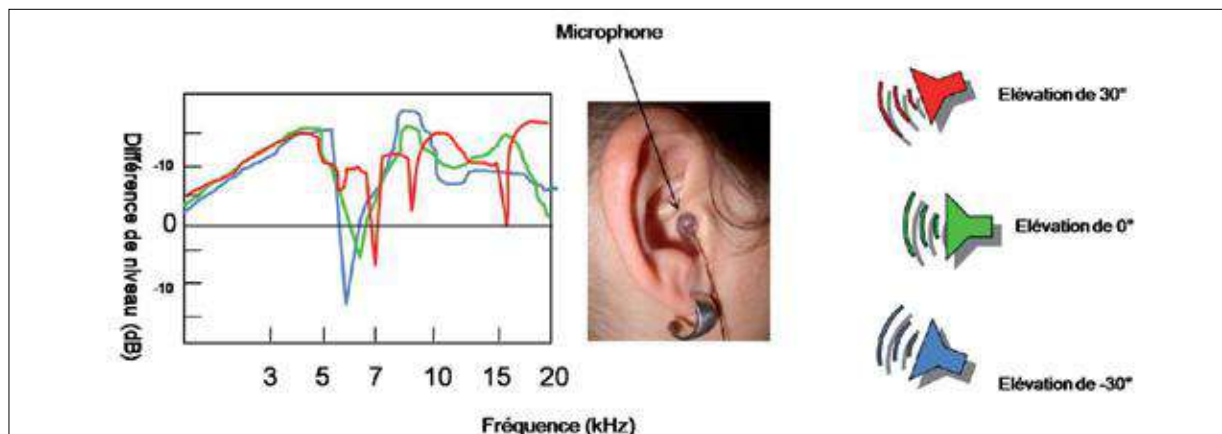


Fig. 1 : Modification de l'intensité des fréquences du spectre de l'onde sonore incidente induites par le relief de l'oreille externe pour trois sources sonores situées à différentes élévations (-30°, 0°, +30°), (adapté de [7]).

L'auditeur reste cependant capable de localiser des sons de basses fréquences en utilisant le délai temporel entre l'arrivée de l'onde sonore à chaque oreille, appelée différence interaurale de temps (DIT). Lord Rayleigh propose dès 1907 [2] que l'azimut soit codé par la DII pour les sons de hautes fréquences et par la DIT pour les sons de basses fréquences (*Duplex Theory*). Pour les sons complexes comportant des hautes et basses fréquences, la DIT serait l'indice dominant [3]. Il faut mentionner qu'à une DIT ou une DII donnée correspondent une infinité de points dans l'espace. Ces points dessinent un cône centré sur l'axe interaural, appelé «cône de confusion» [4]. Localiser la source sonore au sein du cône de confusion requiert d'autres indices que les indices binauraux : les indices spectraux et les indices dynamiques.

Les indices spectraux

Avant de parvenir au tympan, le spectre d'une onde sonore est modifié par les reliefs anatomiques de la partie supérieure du corps (principalement les oreilles externes, mais également la tête et le torse) qui agissent à la manière d'un filtre spectral en haussant ou diminuant l'intensité de certaines fréquences. Cette modification spectrale est directement fonction de l'élévation de la source et de sa position avant/arrière ; elle fournit ainsi des indices au cerveau sur la localisation de la source (Figure 1). Du fait de leurs dimensions, les oreilles externes n'interagissent qu'avec des ondes de fréquences supérieures à 3-4 kHz. Le spectre d'une source sonore doit donc s'étendre au-delà de 3-4kHz, et idéalement au-delà de 10 kHz pour que la source soit localisée correctement. Pour des sources situées en arrière, le pavillon des oreilles agirait comme un obstacle acoustique provoquant une sorte d'entaille dans le spectre autour de 3-6kHz [5]. Dans la vie courante, il est possible de mettre en évidence le rôle des indices spectraux sur la détermination de la position avant/arrière ; face à une source sonore émettant une large gamme de fréquences (par exemple un ventilateur), le fait de former avec ses mains posées devant ses oreilles une coquille ouverte vers l'arrière modifie la position perçue de la source qui semble «sauter» derrière soi [6].

Les indices dynamiques

En condition naturelle, les positions relatives de la tête et de la source sont rarement figées, l'auditeur, comme la source, se déplacent plus ou moins librement. Du fait de ces déplacements, les indices binauraux et spectraux sont modifiés en permanence. Des indices dynamiques peuvent être extraits des variations des indices binauraux et sont susceptibles d'être utilisés par le système auditif pour déterminer la position avant/arrière d'une source sonore [8,9]. L'utilisation des indices dynamiques impose que le stimulus dure au minimum 150 ms environ et idéalement plusieurs secondes.

La fonction de transfert liée à la tête

Le son spatialisé ou son 3D est une technologie visant à présenter sous casque une stimulation acoustique de telle façon que l'auditeur la perçoive comme issue d'un point précis de l'espace. Il s'agit d'une technique beaucoup plus écologique que la stéréophonie classique pour laquelle lors d'une écoute au casque, le son, bien que latéralisé, semble provenir de l'intérieur de la tête. Le son 3D repose sur la reproduction des modifications acoustiques (incluant les indices de localisation, spectraux et binauraux) entre une source sonore située à un endroit précis de l'espace et le tympan de l'auditeur (pour une revue récente voir Nicol [10]). Ces modifications acoustiques sont décrites par une fonction mathématique appelée fonction de transfert liée à la tête ou HRTF (Head Related Transfert Function). Deux principales méthodes de mesure des HRTFs ont été développées, la méthode «conduit ouvert» et la méthode «conduit bloqué» :

- la méthode conduit ouvert : Cette méthode est la première à avoir été mise au point [11]. Elle consiste à introduire dans le conduit auditif externe (CAE) un tube souple d'environ 1 mm de diamètre dont une extrémité est placée au plus près du tympan (1 à 2 mm) tandis que l'autre extrémité, arrivant au niveau de la joue, est reliée à un microphone.



Fig. 2 : L'image de gauche montre l'automate de mesure des HRTFs dans la chambre semi-anéchoïque de l'Institut de recherche biomédicale des Armées. L'image de droite illustre le placement d'un microphone selon la technique « conduit bloqué ».

- la méthode conduit bloqué [12,13] : Dans cette méthode, la stimulation acoustique est mesurée non pas à proximité du tympan mais à l'entrée du CAE (le microphone est entouré de silicone pour le maintenir en position, l'ensemble obstruant le CAE (Figure 2).

Une fois les microphones mis en place selon l'une ou l'autre méthode, la mesure des HRTFs codant pour une position de l'espace consiste à placer un haut-parleur dans la position correspondante (Figure 2) et à émettre une stimulation acoustique dont les caractéristiques spectrales, temporelles et d'intensité sont calibrées. Dès lors, pour reproduire, via des écouteurs, la perception d'une source sonore située à proximité de l'auditeur (source sonore virtuelle), il suffit d'appliquer les HRTFs à un bruit présenté sous casque. L'auditeur perçoit alors virtuellement la source localisée dans l'espace. Pour que la stimulation acoustique restituée sous casque soit la plus proche possible de celle qu'aurait produite une source réelle, il est nécessaire de prendre en compte les modifications acoustiques induites par le casque, c'est-à-dire la fonction de transfert du casque (HTF : Headphone Transfer Function) [14]. L'HTF est la résultante des modifications acoustiques du signal qui ont deux causes : (1) le fait que le haut-parleur du casque n'est pas un émetteur parfait et (2) le couplage anatomique oreille/casque, c'est-à-dire la relation spatiale unique entre l'oreille particulière d'un individu et le casque, sa taille et sa forme, ses matériaux. L'HTF est réalisée de la même manière que les HRTFs, et idéalement en même temps [11]. Chez un même auditeur, l'HTF peut varier d'une pose de casque à l'autre. Pour éliminer les problèmes liés à cette variation, il convient idéalement de mesurer l'HTF pour un nombre répété de

positionnement du casque et d'en déduire une fonction optimale [15]. Cette dernière est rarement une fonction moyenne mais plutôt celle qui semble la plus « correcte » à l'ingénieur réalisant la mesure, ce qui introduit une part de subjectivité (Pellieux L., communication personnelle, 2011). Lors de la restitution, l'HTF est compensée via un filtrage inverse. Cependant, une telle correction, si elle est imparfaitement réalisée, risque d'introduire des modifications spectrales pouvant perturber les indices spectraux. Une solution alternative consiste à réaliser une égalisation « champ diffus » [16]. Cette technique se base sur un « moyennage » de l'ensemble des mesures ; elle permet de distinguer les composants directionnels et non directionnels (dont fait partie l'HTF). L'égalisation « champ diffus » est une technique qui ne requiert pas de jugement de la part de l'ingénieur, elle est objective et facilite donc les comparaisons entre auditeurs.

Lorsqu'un auditeur écoute à travers des HRTFs mesurées sur lui-même, on parle d'HRTFs personnalisées, dans le cas contraire, on parle d'HRTFs non personnalisées. Lorsque les sources sonores sont reproduites en HRTFs personnalisées, le réalisme est tel que les auditeurs ne sont pas capables de distinguer sources réelles et sources virtuelles [17,18]. Avec des HRTFs non personnalisées, l'auditeur se trouve dans une situation d'écoute « à travers les oreilles de quelqu'un d'autre ». Plusieurs types d'HRTFs non personnalisées existent selon qu'elles aient été mesurées sur un mannequin, une tête artificielle, ou sur un autre auditeur.

Une autre méthode de mesure d'HRTFs utilise le principe de réciprocité en plaçant la source sonore à l'intérieur du CAE d'un auditeur. Ce dernier prend place au centre

d'une sphère imaginaire dont la surface est recouverte de microphones uniformément répartis [19]. Il suffit alors d'émettre un seul signal pour mesurer les HRTFs correspondant aux emplacements des microphones. Grâce à cette méthode très rapide, une production «de masse» d'HRTFs personnalisées serait envisageable.

Les capacités de localisation des auditeurs varient selon que les sources sont virtuelles ou réelles. L'élévation des sources virtuelles est généralement moins bien perçue que celle des sources réelles. Par ailleurs, il arrive quelquefois que l'auditeur perçoive la source sonore derrière lui alors qu'elle est en réalité devant (ou, plus rarement, le contraire), on parle d'inversion avant/arrière. Ce phénomène est fréquent avec des sources virtuelles. La baisse de l'acuité en élévation et la survenue d'inversions avant/arrière sont plus marquées avec des HRTFs non personnalisées qu'avec des HRTFs personnalisées. Il faut enfin signaler une variabilité inter-individuelle dans les capacités de localisation. Cette variabilité inter-individuelle est plus élevée avec des sources virtuelles (surtout en HRTFs non personnalisées) qu'avec des sources réelles [20].

Comme en condition d'écoute naturelle, la perception en son 3D est facilitée par la présence d'indices dynamiques. La mesure des HRTFs étant statique, les indices dynamiques doivent être introduits *a posteriori*. L'incorporation des indices dynamiques est rendu possible par un suivi des mouvements de la tête du sujet à l'aide d'un appareil approprié (Polhemus Fastrack par exemple). Le gain est très appréciable en termes de réalisme et de réduction des inversions avant/arrière si le temps de latence lors l'actualisation des signaux pendant le mouvement de la tête est suffisamment court (inférieur à 250ms) [21].

Applications de la technologie son 3D en aéronautique

Le son 3D redonne à l'opérateur la possibilité d'utiliser pleinement son audition spatiale pour l'aider à localiser des cibles, réagir à des alarmes, gérer les systèmes de communication voire lutter contre la désorientation spatiale. Le son 3D peut participer ainsi à améliorer la sécurité de l'opérateur.

Les études présentées ci-après ont été réalisées dans un contexte aéronautique militaire ou civil [22].

Localiser des cibles

D'un point de vue écologique, une des fonctions de l'audition est d'orienter le regard («les oreilles guident les yeux»). Dans le cockpit, associer un son spatialisé à une cible visuelle réduit son temps d'acquisition particulièrement si la cible est en dehors du champ visuel [23]. Le fait de localiser une cible peut être vital en cas de risque de collision. Lorsqu'il cherche à éviter une collision, le pilote s'aide d'un écran du cockpit sur lequel figure la position du danger. A plusieurs reprises, il doit regarder à l'extérieur et vers cet écran pour actualiser la position de son avion par rapport à l'autre avion. Il ne dispose que de quelques secondes pour manœuvrer. Grâce au son 3D, le temps nécessaire à localiser l'avion à éviter est significativement diminué (d'environ 20%) [24].

Réagir à des alarmes

D'après une étude en simulateur d'hélicoptère de combat, le temps de réaction à des alarmes est significativement réduit lorsque le son 3D est utilisé en complément d'une information visuelle [25]. Les résultats sont équivalents que le son 3D soit utilisé pour spatialiser une alarme sonore vocale («feu dans le moteur gauche») ou non vocale (simple signal sonore).

Gestion de systèmes de communication multi canaux

Au sein du cockpit, le pilote gère plusieurs canaux de communication radio au travers d'une écoute monophonique au casque. Il doit interagir avec de nombreux interlocuteurs situés à l'intérieur ou à l'extérieur de l'aéronef : personnel en soute, ailiers, tour de contrôle, centre de commandement. Le son 3D permet de séparer spatialement ces différents canaux³. L'avantage est double : d'une part, le pilote identifie sans erreur son interlocuteur grâce à la localisation [26] et d'autre part, il peut focaliser son attention sur un canal radio parmi d'autres et ainsi en améliorer l'intelligibilité [27] (recréant une situation dite de «cocktail party» [28] où lorsque plusieurs personnes parlent en même temps, le fait de se focaliser sur un locuteur en particulier facilite la compréhension de son discours). Dans les AWACS (*Airborne Warning and Control System*), avion radar utilisé comme tour de contrôle embarquée, le son 3D pourrait améliorer non seulement l'intelligibilité mais surtout le temps de réaction des contrôleurs aériens aux messages urgents et critiques [29]. Par ailleurs, actuellement pour différencier les canaux radios entre eux, les opérateurs utilisent un pré réglage du volume (S. Hourlier, 2008). La gamme de volume étant réduite, il arrive souvent que des niveaux potentiellement dangereux pour l'oreille soient atteints. Le son 3D apporte une alternative qui ne menace pas la fonction auditive.

Contremesure à la désorientation spatiale

La désorientation spatiale est la cause d'un nombre élevé d'accidents aériens. La recherche de contremesures est un enjeu de sécurité. Le son 3D pourrait aider le pilote à conserver une représentation correcte de son orientation dans l'espace, par exemple en le renseignant sur l'angle de roulis de son avion [30]. L'angle de roulis serait indiqué par la différence interaurale d'intensité : si le signal est plus intense à gauche, l'avion est incliné sur la gauche et il est d'autant plus incliné que la différence interaurale est élevée.

Plus largement, la pertinence de l'utilisation du son 3D est renforcée dans des conditions où la vision du pilote est mise à mal ou sollicitée par une autre tâche (limitation du champ visuel par le cockpit, éblouissement, vol de nuit, consultation des instruments de vol, haute charge de travail visuelle, hypoxie, accélération +Gz) [31]. Enfin, plus qu'une amélioration de l'efficacité pour une tâche particulière, les opérateurs militaires ou civils évoquent surtout une réduction de l'effort mental ressenti grâce au son 3D [32,33].

³-Cette application du son 3D est déjà utilisée dans les avions de chasse (F-16) de l'armée de l'air danoise.

Travaux récents dans la recherche de défense en France

Pour profiter pleinement du gain en termes d'efficacité et de sécurité qu'apporte le son 3D, il est nécessaire de prendre en compte l'existence de contraintes liées à l'auditeur comme ses capacités de localisation auditive, et sa faculté à s'adapter au son 3D [34]. L'étude de ces contraintes figure parmi les thématiques de l'Institut de recherche biomédicale des Armées (IRBA) à Brétigny sur Orge (Essonne). Plusieurs équipements très spécifiques permettant de mener des expérimentations sur le son 3D sont réunis à l'IRBA dont une chambre semi-anéchoïque (152 m³) avec un automate de mesure des HRTFs, une chambre réverbérante (204 m³) permettant de recréer des ambiances sonores réalistes, et un environnement de présentation de sources sonores virtuelles. En 2005, l'IRBA (alors IMASSA, Institut de médecine aérospatiale du Service de santé des Armées) a participé au programme PERTIA lancé par la DGA sous la coordination de Didier Bazalgette. Ce programme a été conduit en collaboration avec l'organisme australien de défense DSTO dans l'objectif d'étudier, entre autres, l'usage et la génération de son 3D à bord d'hélicoptères de combat. Le programme PERTIA a comporté une phase d'essai en vol sur NH-90 (hélicoptère de transport) avec des pilotes militaires. Cette étape très importante sur le chemin d'une utilisation à grande échelle du son 3D, a permis de confirmer plusieurs résultats obtenus précédemment en laboratoire, notamment l'efficacité du son 3D pour l'aide à la gestion de systèmes de communication multicanaux et des alarmes. Le programme PERTIA comportait également une étude en laboratoire qui visait à évaluer les capacités de localisation de sources sonores virtuelles chez des auditeurs néophytes. L'étude comparait les performances en HRTFs personnalisées et non personnalisées, dans le silence et dans une ambiance sonore reproduisant celle à bord d'un hélicoptère de combat (Figure 3). Les auditeurs portaient des équipements opérationnels (casque, tenue).

Cette étude a confirmé une grande variabilité inter-individuelle dans les performances de localisation, c'est-à-dire que l'erreur de localisation était faible pour certains auditeurs et élevée pour d'autres [36]. Cette étude a également mis en évidence le faible impact du bruit ou du type d'HRTF sur les performances des auditeurs. Ce dernier résultat, peu attendu, est probablement à mettre en lien avec le caractère néophyte des auditeurs. D'autres investigations sont en cours pour compléter cette première explication. Les résultats de PERTIA ont conduit à s'intéresser aux aspects d'entraînement à la localisation de sources sonores virtuelles et aux origines de la variabilité inter-individuelle. Des travaux menés à l'IRBA, et soutenus par la DGA, tentent de mettre à profit la plasticité de la localisation auditive [37,38] pour entraîner les futurs utilisateurs du son 3D. Ces travaux ont déjà montré le rôle d'une structure des voies auditives descendantes dans la variabilité inter-individuelle en localisation auditive dans le bruit : le faisceau olivo-cochléaire efférent médian [39]. D'autres travaux sont en cours pour explorer différents protocoles d'entraînement.



Fig. 3 : Auditeur participant à la phase du programme PERTIA portant sur la localisation auditive dans un bruit d'hélicoptère

Conclusion

En restituant sous casque le plein usage de l'audition spatiale, le son 3D apporte à l'opérateur un gain sensible pour l'efficacité, la sécurité, et le confort de sa mission. Les atouts de cette technologie sont accessibles au prix de précautions méthodologiques et métrologiques qui ne doivent pas être négligées. Du fait d'une réelle variabilité inter-individuelle dans les capacités de localisation auditive, un usage optimal du son 3D nécessite une phase de familiarisation voire d'entraînement. Au sein de l'IRBA, des travaux sont en cours de développement pour d'une part identifier les sources de cette variabilité inter-individuelle et d'autre part définir au mieux les caractéristiques des entraînements à proposer.

Références bibliographiques

- [1] Middlebrooks, J.C. and D.M. Green, Sound localization by human listeners. *Annu Rev Psychol*, 1991. 42: p. 135-159
- [2] Rayleigh, L., On our perception of sound direction. *Philos. Mag*, 1907. 13: p. 214-232
- [3] Wightman, F.L. and D.J. Kistler, The dominant role of low-frequency interaural time differences in sound localization. *J Acoust Soc Am*, 1992. 91(3): p. 1648-1661
- [4] Woodworth, R.S., in *Experimental Psychology*, R.A.W. Holt, Editor 1938: New York. p. 349-361
- [5] Carlille, S. and D. Pralong, The location-dependent nature of perceptually salient features of the human head-related transfer functions. *J Acoust Soc Am*, 1994. 95(6): p. 3445-3459
- [6] Begault, D.R., 3-D sound for virtual reality and multimedia 1994: Academic Press
- [7] Goldstein, E.B., *Sensation and perception* 2009: Wadsworth Pub Co

- [8] Wightman, F.L. and D.J. Kistler, Resolution of front-back ambiguity in spatial hearing by listener and source movement. *J Acoust Soc Am*, 1999. 105(5): p. 2841-2853
- [9] Wallach, H., The role of head movements and vestibular and visual cues in sound localization. *J Exp Psychol*, 1940. 27(4): p. 339
- [10] Nicol, R., Binaural Technology 2009: AES Monograph
- [11] Wightman, F.L. and D.J. Kistler, Headphone simulation of free-field listening. I: Stimulus synthesis. *J Acoust Soc Am*, 1989. 85(2): p. 858-867
- [12] Møller, H., et al., Head-related transfer functions of human subjects. *J Audio Eng Soc*, 1995. 43(5): p. 300-321
- [13] Martin, R.L., K.J. McAnally, and M.A. Senova, Free-field equivalent localization of virtual audio. *J Audio Eng Soc*, 2001. 49(1/2): p. 14-22
- [14] Pralong, D. and S. Carlile, Generation and validation of virtual auditory space, in *Virtual auditory space: generation and applications*, S. Carlile, Editor 1996: Landes, Austin. p. 109-152
- [15] Wightman, F. and D. Kistler, Measurement and Validation of Human HRTFs for Use in Hearing Research. *Acta Acustica/Acustica*, 2005. 91(3): p. 429-439
- [16] Middlebrooks, J.C., Individual differences in external-ear transfer functions reduced by scaling in frequency. *J Acoust Soc Am*, 1999. 106(3 Pt 1): p. 1480-1492
- [17] Kulkarni, A. and H.S. Colburn, Role of spectral detail in sound-source localization. *Nature*, 1998. 396(6713): p. 747-749
- [18] Langendijk, E.H. and A.W. Bronkhorst, Fidelity of three-dimensional-sound reproduction using a virtual auditory display. *J Acoust Soc Am*, 2000. 107(1): p. 528-537
- [19] Zotkin, D.N., et al., Fast head-related transfer function measurement via reciprocity. *J Acoust Soc Am*, 2006. 120(4): p. 2202-2215
- [20] Wenzel, E.M., et al., Localization using nonindividualized head-related transfer functions. *J Acoust Soc Am*, 1993. 94(1): p. 111-123
- [21] Wenzel, E.M. Effect of increasing system latency on localization of virtual sounds. in *Audio Engineering Society 16th International Conference on Spatial Sound Reproduction*. 1999
- [22] Parker, S.P., Construction of 3-D Audio Systems: Background, Research, and General Requirements, 2008, Defense Science and Technology Organisation
- [23] Bolia, R.S., W.R. D'Angelo, and R.L. McKinley, Aurally aided visual search in three-dimensional space. *Hum Factors*, 1999. 41(4): p. 664-669
- [24] Begault, D.R. and M.T. Pittman, Three-dimensional audio versus head-down traffic alert and collision avoidance system displays. *Int J Aviat Psychol*, 1996. 6(1): p. 79-93
- [25] Haas, E.C. Can 3-D auditory warnings enhance helicopter cockpit safety. 1998. Human Factors and Ergonomics Society
- [26] Drullman, R. and A.W. Bronkhorst, Multichannel speech intelligibility and talker recognition using monaural, binaural, and three-dimensional auditory presentation. *J Acoust Soc Am*, 2000. 107(4): p. 2224-2235
- [27] Ericson, M. and R. McKinley, The intelligibility of multiple talkers spatially separated in noise. Binaural and spatial hearing in real and virtual environments, 1997: p. 701-724
- [28] Yost, W.A., The cocktail party problem: Forty years later. Binaural and spatial hearing in real and virtual environments, 1997: p. 329-348
- [29] MacDonald, J.A., et al., Intelligibility of speech in a virtual 3-D environment. *Hum Factors*, 2002. 44(2): p. 272-286
- [30] Bles, W., Spatial disorientation countermeasures-Advanced problems and concepts. *Spatial disorientation in aviation*, 2004: p. 509-540
- [31] Bronkhorst, A.W., J.A. Veltman, and L.V. Vreda, Application of a Three-Dimensional Auditory Display in a Flight Task. *Hum Factors*, 1996. 38(1)
- [32] Bolia, R.S. Spatial intercoms for air battle managers: Does visually cueing talker location improve speech intelligibility. in *12th International Symposium on Aviation Psychology*. 2003
- [33] Nelson, W.T., et al., Effects of Localized Auditory Information on Visual Target Detection Performance Using a Helmet-Mounted Display. *Hum Factors*, 1998. 40(3): p. 452-461
- [34] Parker, S.P.A., et al., Effects of supplementing head-down displays with 3-D audio during visual target acquisition. *Int J Aviat Psychol*, 2004. 14(3): p. 277-295
- [35] Andeol, G. and A. Guillaume, Le son 3D en aéronautique : applications et contraintes. *Rev Med Aero Spat*, 2010. 51(189): p. 5-12
- [36] Sarafian D., Pellieux L., Bouy J.C., Andeol G., 3D sound in the helicopter environment: localisation performance, in *Binaural Processing and Spatial Hearing*, D.T. Buchholz J.M., Dalsgaard J.C., Poulsen T., Editor 2009: Helsingor. p. 128-141
- [37] Savel, S., C. Drake, and G. Rabau, Human Auditory Localisation in a Distorted Environment: Water. *Acta Acustica/Acustica*, 2009. 95(1): p. 128-141
- [38] Hofman, P.M., J.G. Van Riswick, and A.J. Van Opstal, Relearning sound localization with new ears. *Nat Neurosci*, 1998. 1(5): p. 417-421
- [39] Andeol, G., et al., Auditory Efferents Facilitate Sound Localization in Noise in Humans. *J Neurosci*, 2011. 31(18): p. 6759-6763