



HAL
open science

Mesure de latence d'un système de head-tracking pour l'écoute spatialisée dynamique

Clément Rappin, Julian Palacino, Laurent Feichter, Mathieu Paquier

► **To cite this version:**

Clément Rappin, Julian Palacino, Laurent Feichter, Mathieu Paquier. Mesure de latence d'un système de head-tracking pour l'écoute spatialisée dynamique. 16ème Congrès Français d'Acoustique, CFA2022, Société Française d'Acoustique; Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Apr 2022, Marseille, France. hal-03848046

HAL Id: hal-03848046

<https://hal.science/hal-03848046>

Submitted on 10 Nov 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



16^{ème} Congrès Français d'Acoustique
11-15 Avril 2022, Marseille

Mesure de latence d'un système de head-tracking pour l'écoute spatialisée dynamique

C. Rappin ^{a,b}, J. Palacino ^b, L. Feichter ^b, M. Paquier ^a

^a Université de Bretagne Occidentale, CNRS, Lab-STICC UMR 6285, Brest, France

^b Feichter Electronics, Lannion, France,



Un système de head-tracking permet de suivre les mouvements de tête d'un auditeur et de modifier le rendu sonore en conséquence. Lors d'une écoute binaurale, son utilisation améliore l'expérience : perception plus réaliste de la scène sonore, sources statiques lors d'un mouvement de tête de l'auditeur, externalisation améliorée... L'intérêt d'un tel système est à la fois pratique (pour le grand public lors d'expériences immersives) et scientifique (pour l'élaboration de tests perceptifs). Néanmoins, ce type de système induit une latence entre le mouvement de l'auditeur et le rendu sonore qui, en fonction de son amplitude, serait contre-productive pour la qualité de l'expérience.

Lors d'un rendu sonore avec suivi, il est nécessaire de connaître la latence du système. Actuellement, les dispositifs de tracking disponibles sur le marché affichent une latence dont l'ordre de grandeur est similaire aux seuils de détection répertoriés par la littérature. Ainsi, une méthode de mesure fiable est nécessaire pour connaître l'efficacité de ces systèmes. Diverses méthodes de la littérature permettent d'évaluer la latence totale (*motion-to-sound latency*) du système mais sans isoler les différents éléments de la chaîne. Dans cette étude préliminaire, nous présentons plusieurs méthodes de mesures de latence en nous intéressant uniquement à la contribution du système de tracking, car il comporte la latence la plus élevée du système complet. Ce type de mesure permettra d'étudier plus précisément la contribution de la latence dans la perception d'une scène sonore spatialisée

1 Introduction

L'écoute de contenus spatialisés se démocratise de plus en plus pour le grand public, et avec cette démocratisation le besoin d'évaluer la qualité d'expérience des auditeurs devient un enjeu de taille. L'ajout d'un système de suivi des mouvements de tête (ou head-tracking) est déjà connu pour améliorer l'expérience d'écoute en binaural [1, 2, 3]. En effet, sans système de head-tracking, une source virtuelle va suivre les mouvements de tête de l'auditeur (comme si elle était "collée" à l'oreille). Au contraire, avec un système de head-tracking, la scène sonore virtuelle est dynamique et dépend de l'orientation de la tête de l'auditeur. Chaque orientation correspond à une HRTF (*Head-Related Transfer Function*) afin que les sources conservent une position absolue statique. Le head-tracking, en plus d'augmenter le réalisme et le naturel de la scène sonore, possède également d'autres vertus comme améliorer l'externalisation, malgré des HRTF non -individualisés [4].

L'intérêt d'un tel système est double : pour le grand public, lors d'expériences immersives (muséographie, réalité virtuelle/augmentée, jeux vidéo etc...) mais également lors de tests perceptifs contenant une l'écoute spatialisée dynamique (notamment le binaural), ou nécessitant des conditions d'écoutes écologiques.

Néanmoins, quelque soit le système de head-tracking utilisé, une latence est obligatoirement présente lors de la transmission et le traitement des données, c'est-à-dire entre le mouvement de l'auditeur et le rendu sonore. En fonction de l'amplitude de cette latence, la qualité d'expérience de l'écoute pourrait être fortement dégradée, peut-être plus que sans head-tracking.

Plusieurs méthodes permettant de mesurer la latence d'un système de tracking provenant de l'état de l'art sont décrites puis analysées. De nouvelles méthodes de mesures sont ensuite proposées, avec comme problématique de mesurer la latence du système de tracking uniquement, en respectant un mouvement de tête réaliste.

2 État de l'art

La latence d'un système correspond à la durée entre une action, entraînée par un stimulus, et la réponse à ce stimulus. Le système peut être plus ou moins complexe, c'est-à-dire être composé de plusieurs éléments, eux mêmes possédant leur propre latence. Ainsi, la latence totale d'un système n'est finalement qu'une somme de latence plus courtes.

Dans le cas du head-tracking, le stimulus « déclencheur » est le mouvement de tête d'un auditeur et la latence du système correspond au temps s'écoulant entre ce mouvement de tête et la rotation de la scène sonore en conséquence. Il est possible de décomposer la chaîne en plusieurs éléments, dont deux principaux : la partie transmission d'information (entre le capteur et le moteur de rendu) et la partie traitement de l'information (entre le moteur de rendu et le son produit aux oreilles de l'auditeur).

Ces éléments peuvent eux-mêmes être décomposés en sous-éléments. Pour la partie transmission par exemple, il est possible de séparer la réception de l'information par les capteurs, la modification potentielle de cette information (comme des calculs d'interpolation du mouvement, du filtrage ou du lissage) et enfin la transmission de l'information jusqu'au moteur de rendu.

Dans plusieurs études portant sur la détection de latence d'un head-tracking, l'attention est portée sur la latence totale. C'est en effet la somme de toutes les sous-latences d'un système qui influence la perception. Ce type de mesure est relativement simple à réaliser, car il n'est pas nécessaire d'isoler les divers éléments de la chaîne.

2.1 Méthodes de mesure dans l'état de l'art

Adelstein [5] développe une méthode de mesure d'un système de tracking en utilisant un bras mécanique motorisé. Le déplacement de ce bras est programmable et il est ainsi possible de comparer les mouvements mécaniques avec les données du tracker. Cette méthode permet de mesurer uniquement la latence du système de tracking.

Cette méthode sera modifiée par Wenzel [6]. Le rendu audio d'une scène sonore est coupé, excepté pour une orientation (correspondant à l'HRTF centrale, 0° , 0°). En comparant le mouvement du bras avec l'apparition d'un stimulus audio, il est possible de mesurer la latence totale du système, moteur de rendu audio inclus.

Brungart [7] s'appuie sur la méthode précédente. Le dispositif est placé sur un disque rotatif, dont l'orientation est contrôlée par un système optique. Lorsque ce dernier affiche une orientation de 0° , une mesure de durée se déclenche et s'arrête lors de l'apparition du signal audio.

Lindau [8] utilise également un bras mécanique sur lequel est fixé le head-tracker en se basant sur la méthode décrite par Miller [9]. Le moteur de rendu audio est paramétré pour générer un silence audio à 0° uniquement, position initiale du bras avant son déplacement. Lorsque le bras est déplacé, un courant électrique se coupe causant une perte de tension, puis, le head-tracker ayant bougé de sa position initiale, un son est rendu (signal carré). Les deux signaux (signal électrique et signal audio) sont ensuite comparés sur un oscilloscope, ce qui permet de mesurer la latence.

Dans le cadre de la VR, Estrella et Plogsties [10] comparent deux signaux : le premier est un signal de référence généré à partir du mouvement d'un head-tracker; le second correspond au signal audio de sortie d'un HMD (*Head-Mounted Display*). La méthode consiste à enregistrer les signaux simultanément, puis à calculer leur corrélation. La mesure se fait avec un utilisateur tournant la tête de façon réaliste.

2.2 Tests de détection de latence

Les résultats obtenus par les tests perceptifs portant sur la détection de latence des dispositifs de head-tracking sont relativement variables. Les seuils les plus bas (sujets les plus performants) indiquent une valeur d'environ 50 ms et les valeurs les plus hautes dépassent, parfois même très largement, 100 ms [8, 11, 12, 13].

2.3 Remarques sur l'état de l'art

Plusieurs remarques peuvent être tirées de la littérature. D'une part, les temps de latence calculés sont souvent des temps de latence "totale", ou *motion-to-sound latency*, sans isoler les différents éléments de la chaîne, notamment les deux principaux, à savoir : la latence de transmission et la latence de traitement par le rendu audio. D'autre part, les latences mesurées (ou données constructeurs fournies) sont du même ordre de grandeur que les seuils bas de détection de latence déduit par tests perceptifs (quelques dizaines de millisecondes). Certaines méthodes sont également assez lourdes à mettre en place ou ne sont pas représentative d'un mouvement de tête.

Ainsi, une méthode fiable est nécessaire pour mesurer la

latence des systèmes de head-tracking (ou plus largement des systèmes de tracking). C'est une étape fondamentale pour, par exemple, pouvoir étudier avec plus de précision l'influence de différentes techniques de rendu de son spatialisé d'un point de vue de la latence, ou bien encore pour réaliser des tests perceptifs concernant des seuils de détections de latence. Cette méthode devrait être la plus simple possible, et être représentative d'un mouvement de tête.

3 Méthodes de mesure de latence

Dans les paragraphes suivants, diverses méthodes de mesures sont proposées tout en exposant leur avantages et désavantages. Dans tous les cas, le but est de mesurer la latence du dispositif de tracking uniquement, sans prendre en compte le rendu audio spatialisé.

3.1 Mesure par enregistrement vidéo

Dans un premier temps, il est intéressant de réaliser une mesure simple et rapide afin d'estimer la latence du head-tracker. Une mesure préliminaire consiste à filmer la réception des données sur l'ordinateur (en affichant en temps réel le flux de données sur l'ordinateur ou via un logiciel utilitaire propre au capteur) tout en filmant, dans le même cadre, le head-tracker en position initiale fixe. Les valeurs reçues par l'ordinateur sont donc constante (le flux de données fourni en continu toujours la même valeur). Un expérimentateur vient ensuite perturber le head-tracker (en le faisant bouger), ce qui aura pour influence une modification des valeurs du flux de données. En filmant dans le même cadre le capteur et l'écran de l'ordinateur, il est possible d'en déterminer la latence qui correspond simplement au temps qui s'écoule entre l'image affichant le mouvement du capteur et celle affichant l'arrivée d'une nouvelle valeur dans le flux de données.

Néanmoins, pour que cette méthode soit efficace, elle nécessite à la fois une caméra et un écran à cadence très rapide. Les écrans d'ordinateur ont pour la plupart une fréquence d'affichage de 60 Hz (soit une image toutes les 16,7 ms), les écrans performants jusqu'à 240 Hz (soit une image toutes les 4,2 ms). C'est ce dernier équipement qui possède la plus grande imprécision car les caméras à cadence rapide peuvent enregistrer jusqu'à 25 000 Hz pour les plus performantes. La mesure est donc possible et permet d'estimer relativement bien la latence avec une précision de l'ordre de 5 ms; mais nécessite un matériel spécifique. Il faut de plus s'assurer qu'aucune latence due à un traitement d'affichage (hors de la cadence de l'écran) n'est présente.

3.2 Mesure par pic audio

Comme l'affichage vidéo comporte trop d'incertitudes, nous proposons une autre méthode plus simple, tout en s'affranchissant de la notion d'affichage. Cette seconde

méthode cherche à comparer un signal audio de référence aux données du capteur de mouvement de tête.

Le head-tracker est positionnée de façon stable sur une table, envoyant ainsi toujours la même valeur sur le flux de données. Le signal audio d'un microphone est en parallèle numérisé et enregistré. L'expérimentateur percute le tracker avec le microphone afin qu'il effectue une rotation sur lui-même. Ce mouvement provoque à la fois une nouvelle position (c'est-à-dire une variation de la valeur transmise dans le flux de données) et un pic audio sur le signal microphonique. Ce dernier se produit au moment de l'impact c'est-à-dire au début du déplacement du tracker. Il suffit donc de mesurer le temps qui s'écoule entre ce pic signal audio et le changement du flux de données.

La latence de la carte son est prise en compte pour obtenir la latence du dispositif de head-tracking. Cette valeur est mesurée aisément à l'aide d'un oscilloscope et comparée avec les données constructeur.

Cette méthode est directe et facile de mettre en oeuvre; mais elle oblige tout de même à fixer un seuil. En effet, il est nécessaire de définir au-delà de quel degré de variation le flux de données est considéré différent; et également au delà de quel niveau électrique le pic du microphone doit être détecté. De plus, la définition des seuils n'est pas aisée car leurs niveaux dépendent de la force et l'angle d'impact, ce qui nuit à la répétabilité des mesures. Enfin, le mouvement réalisé par le head-tracker n'est pas vraiment représentatif d'un mouvement de tête (peut-être que les capteurs possèdent un comportement différent en fonction du mouvement, lié par exemple à des algorithmes d'interpolation).

3.3 Mesure par potentiomètre

Une dernière méthode de mesure est élaborée afin de se rapprocher de mouvements réalistes et répétables. Un potentiomètre est disposé dans une boîte solidement maintenue sur une surface plane. Un système de head-tracking est placé sur ce potentiomètre, centré sur l'axe de rotation. Un signal continu est généré via un appareil externe (type GBF) dont l'amplitude est modulée par le potentiomètre et acquise par une carte son. En parallèle, le flux de données du head-tracking est récupéré sur l'ordinateur. Il est possible de calculer la latence en comparant les modulations d'amplitude du signal audio avec les variations de données du head-tracker (voir Figure 1).

Pour augmenter la répétabilité des mesures et simuler un mouvement de tête réaliste, le système est piloté par un moteur programmable en vitesse et en amplitude. L'arbre de ce dernier est positionné sur l'axe de rotation de l'ensemble (Figure 2).

Avec le montage décrit précédemment, la mesure est effectuée sur un head-tracker T3 de Feichter Audio [14]. Le capteur est collé au potentiomètre à l'aide de ruban adhésif. L'acquisition des données est effectuée à l'aide du logiciel Max/MSP. Ce dernier reçoit simultanément les données du

tracker en OSC et le signal généré par le GBF (sinusoïde à 5 kHz) modulé en amplitude par le potentiomètre.

Pour ne garder que la modulation d'amplitude du signal audio, sa valeur RMS est calculée en continu dès son acquisition sur Max/MSP. Les deux flux de données (signal audio modulé en amplitude par le potentiomètre et données du head-tracker) sont enregistrés en simultané dans un même fichier (voir Figure 1).

Enfin, ce fichier est ensuite analysé à l'aide d'un script MatLab. Dans un premier temps, les deux signaux sont interpolés. Ensuite, les maxima d'amplitude des deux signaux sont recherchés pour calculer la latence (Figure 3). Les données issus du tracker présentent une quantification liée à la précision de la représentation angulaire, ils possèdent une forme "en escalier". Or, une opération d'interpolation s'avère nécessaire pour la recherche des pics. Nous avons confirmé avec des signaux synthétiques que l'utilisation d'une interpolation permet à l'algorithme de recherche des pics d'obtenir une meilleure précision qu'en utilisant des données non interpolés.

Le moteur est programmée pour effectuer un mouvement de tête répété entre -90° et $+90^\circ$ à plusieurs vitesses entre $100^\circ/s$ et $360^\circ/s$. La mesure est répétée 20 fois puis moyennée pour obtenir la valeur de latence; les écart-types sont également mesurés. Ces données peuvent être retrouvés dans le Tableau 1.

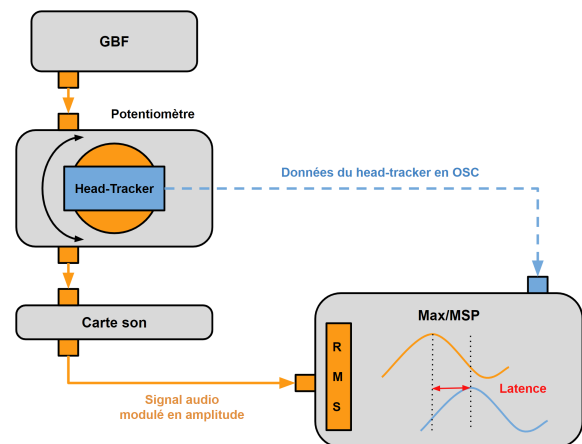


FIGURE 1 – Schéma pour la mesure de latence d'un head-tracker

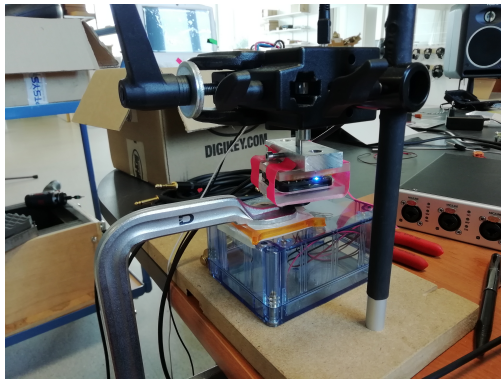


FIGURE 2 – Dispositif pour la mesure de latence par comparaison de signaux. Un axe de rotation motorisé se situe dans la pince, en haut, directement relié aux cales maintenant le head-tracker

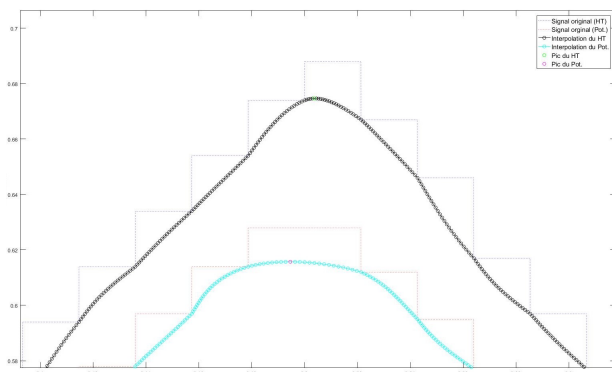


FIGURE 3 – Résultat de l’interpolation sur un seul pic.

4 Discussion

Plusieurs problématiques contraignantes sont présentes durant les mesures de latence. Pour commencer, tous les capteurs ne sont pas du même type et ne fonctionnent pas de la même manière. Par exemple, le mode de transmission et de traitement des données n’est pas identique entre les capteurs se basant sur une centrale inertielle ou des capteurs optiques. Les head-tracker n’ont pas la même forme, ce qui peut modifier le protocole expérimental. Il n’existe pas de méthode de mesure universelle, elle doit s’adapter au capteur, au mode de réception etc . . . ce qui rend difficile les mesures comparatives.

Ensuite, il existe un certain flou au niveau des traitements logiciels (communication interne, influence de l’ordinateur ou de la puissance de calcul, interpolation des données par un élément de la chaîne de traitement complexe à isoler etc...). Cet effet "boîte noire" rend certains éléments difficiles à mesurer et ils ne peuvent donc qu’être estimés ou assumés (en se basant sur la donnée constructeur). Pour la plupart des applications audio, l’impact de cet aspect "boîte noire" est relativement minime, mais pour la latence il est assez critique car le seuil de détection de latence est à priori assez bas (quelques dizaines de millisecondes dans

les cas critiques). Le traitement logiciel inclus également une quantification obligatoire du signal qui va influencer la précision de la mesure.

Enfin, les valeurs mesurées possèdent une certaine variabilité. Il est difficile de savoir si celle-ci provient principalement de la méthode en elle-même, du capteur, ou encore des briques logicielles.

Pour tendre vers une mesure de latence plus rigoureuse, les capteurs devraient finalement être mesurés sur leur couche très bas niveau (signal électrique). Néanmoins, une telle mesure s’éloignerait peut-être trop des conditions d’écoute, prenant en compte les algorithmes d’interpolation de mouvements, les latences de traitements logiciels, ou encore l’instabilité du capteur ; autant d’éléments présents lors d’une utilisation standard.

Les trois méthodes proposées ont été utilisées pour mesurer la latence du tracker T3. En l’absence du matériel adéquat, la mesure par enregistrement vidéo ne présentait pas de résultats pertinents et a donc été écartée. Le tableau suivant résume les résultats obtenus.

Méthode de mesure	Mode de fonctionnement	
	USB - 100 Hz	BLE - 100 Hz
Pic audio	26,1 (± 7,0)	73,5 (± 16,7)
Potentiomètre	39,0 (± 7,4)	86,4 (± 10,2)

TABLEAU 1 – Temps (en ms) de latence moyens et écart-types mesurés pour différentes méthode de mesure. Le tracker T3 possède 2 modes de fonctionnement, l’un en connexion USB et l’autre en connexion BLE (*Bluetooth Low Energy*). Dans les deux cas, la fréquence de transmission des données est de 100 Hz

Les données pour la méthode potentiomètre sont obtenues pour une vitesse de rotation de 150°/s ; le seuil fixé pour la rotation du head-tracker lors de la mesure par pic audio est de 0,02°.

Malgré la mesure d’un seul head-tracker, les résultats ne sont pas identiques. La méthode par pic audio présente une latence moyenne plus basse, notamment car le seuil fixé lors de la mesure est très bas (on considère un mouvement dès 0,02° de rotation). Dans toutes les méthodes, l’écart-type est plus grand en mode de fonctionnement BLE, ce qui est un résultat attendu car le temps de transmission des données dans ce mode est moins stable.

Chaque méthode est appropriée pour différents cas. La méthode par mesure vidéo permet surtout d’estimer la latence d’un système à bas coût, malgré une assez grande incertitude de mesure. Elle pourrait être utilisé pour mesurer la latence totale d’un rendu vidéo si le matériel adéquat (caméra et écran à cadences rapides) est utilisé.

La deuxième méthode, par pic audio, permet de mesurer la latence du tracker uniquement assez facilement et rapidement ; mais sans prendre un compte un mouvement réaliste. Elle souffre de l’utilisation de seuil de valeur, qui

modifie totalement les résultats. Un seuil bas permet la mesure d'une latence "instantanée"; un seuil plus élevé s'approchera d'une latence plus pertinente mais est difficile à fixer.

Enfin, la dernière méthode cherche à simuler un mouvement de tête réaliste. Elle s'applique donc plutôt pour des mesures précises du système lors de tests perceptifs, sans prendre en compte le moteur de rendu audio. Néanmoins, elle s'appuie sur les logiciels pouvant contenir des effets "boîte noire".

Une latence est toujours présente. Dans le cadre des tests perceptifs avec head-tracking, elle n'est pas toujours prise en considération. La latence est au mieux mesurée mais sans indiquer avec précision comment, parfois simplement estimée à l'oreille de l'expérimentateur, au pire négligée; mais elle pourrait avoir un impact sur les performances de localisation, la compréhension de la scène, l'immersion, la sensation de présence dans la scène sonore, la fatigue de l'auditeur etc...

5 Conclusion

En se plaçant dans les cas critiques, pour réaliser des tests de détection de latence de head-tracking par exemple, la chaîne de latence doit être rigoureusement mesurée. Les capteurs utilisés doivent posséder une latence la plus faible possible.

Plusieurs méthodes de mesures ont été proposées et critiquées. Une première méthode par enregistrement vidéo permet une estimation avec du matériel simple, mais peut donner des résultats plus précis avec du matériel spécifique. Une deuxième méthode, utilisant un microphone faisant bouger le capteur, permet une mesure rapide et simple, mais souffrant d'incertitudes liées aux seuils fixés pour traiter les données. Enfin, une dernière méthode se basant sur la comparaison du flux de données avec un signal audio de référence cherche à simuler un mouvement de tête répété. La mesure de latence d'un système de head-tracking s'avère être une tâche complexe en raison de l'utilisation de logiciels, ajoutant des latences de traitements difficiles à mesurer. Un compromis doit être trouvé entre une mesure rigoureuse et une mesure proche des conditions d'écoute.

Références

- [1] D. R. Begault, E. M. Wenzel et M. R. Anderson, Direct comparison of the impact of head tracking, reverberation, and individualized head-related transfer functions on the spatial perception of a virtual speech source. *Journal of the Audio Engineering Society* **49** (10) : 904-16. (2001)
- [2] S. Perrett et W. Noble, The Contribution of Head Motion Cues to Localization of Low-Pass Noise. *Perception & Psychophysics* **59** (7) : 1018-26. (1997)
- [3] F. L. Wightman et D. J. Kistler, Resolution of front-back

- ambiguity in spatial hearing by listener and source movement. *The Journal of the Acoustical Society of America* **105** (5) : 2841-53. (1999)
- [4] E. Hendrickx et al, Influence of Head Tracking on the Externalization of Speech Stimuli for Non-Individualized Binaural Synthesis, *The Journal of the Acoustical Society of America* **141** (3) : 2011-23. (2017)
- [5] B. D. Adelstein, E. R. Johnston et S. R. Ellis, Dynamic Response of Electromagnetic Spatial Displacement Trackers, *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 5, n° 3, p. 302-318 (1996)
- [6] E. M. Wenzel, The Impact of System Latency on Dynamic Performance in Virtual Acoustic Environments, *The Journal of the Acoustical Society of America* **103** (5) : 3026-3026 (1998)
- [7] D. S. Brungart et al., The Interaction between Head-Tracker, Latency, Source Duration, and Response Time in the Localization of Virtual Sound Source, In Proceedings of ICAD 04 - 10th Meeting of the International Conference on Auditory Display. Sydney, Australia (2004)
- [8] A. Lindau, The perception of system latency in dynamic binaural synthesis, In Proc. of 35th DAGA, 1063-66. Rotterdam, Netherlands (2009)
- [9] J. D. Miller et al, Latency Measurement of Real-Time Virtual Acoustic Environment Rendering System, In International Conference on Auditory Display, 111-14. Boston, M (2003)
- [10] J. Estrella et J. Plogsties, Motion-to-Sound Latency Measurement Procedure for VR Sound Reproduction, In Audio Engineering Society Convention 142. Berlin, Germany : Audio Engineering Society. (2017)
- [11] P. Stitt et al, The Influence of Head Tracking Latency on Binaural Rendering in Simple and Complex Sound Scenes, In Audio Engineering Society Convention 140. Paris, France : Audio Engineering Society (2016)
- [12] S. Yairi, I. Yukio et S. Yoiti, Investigation of System Latency Detection Threshold of Virtual Auditory Display, In Proceedings of the 12th International Conference on Auditory Display, 217-22. London, UK (2006)
- [13] D. S. Brungart, B. D. Simpson et A. J. Kordik, The Detectability of Head-Tracker Latency in Virtual Audio Displays, In Proceedings of ICAD 05 - 11th Meeting of the International Conference on Auditory Display, 37-42. Limerick, Ireland (2005)
- [14] Head-Tracker T3, site de Feichter Audio (<http://feichter-audio.com/produits/diffusion/t3/>)