

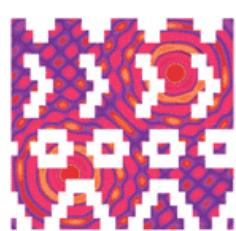
CFA/VISHNO 2016

Effet de différences interaurales de temps sur la sonie de sons purs en fonction de la fréquence

V. Koehl^a, M. Paquier^a et E. Hendrickx^b

^aUBO, Lab-STICC UMR CNRS 6285, 6 avenue Victor Le Gorgeu, CS 93837, 29238
Brest Cedex 3, France

^bConservatoire National Supérieur de Musique et de Danse de Paris, 209 avenue Jean
Jaurès, 75019 Paris, France
vincent.koehl@univ-brest.fr



LE MANS

La sonie directionnelle se traduit par une variation de l'intensité sonore perçue en fonction de la localisation de la source. Ce phénomène a essentiellement été observé en hautes fréquences pour des sources localisées dans le plan horizontal. Les pressions aux oreilles droite et gauche sont alors modifiées selon l'azimut de la source et ces modifications se répercutent dans le processus de sommation binaurale. Pourtant, des variations significatives de la sonie avec l'azimut de la source ont été observées dès 400 Hz, où les pressions aux oreilles sont peu voire pas affectées par la présence de la tête. On peut alors supposer que ce phénomène n'est pas causé uniquement par les modifications physiques subies par les pressions aux oreilles, mais aussi par d'autres paramètres liés au processus de localisation. De récents travaux ont ainsi mis en évidence l'effet de la différence interaurale de temps (ITD) sur la sonie des sons purs en basse fréquence (200 et 400 Hz), cet effet se révélant être dû à l'ITD elle-même et non à la localisation engendrée. Le but de cette étude est d'observer cet effet à des fréquences plus élevées, notamment telles que l'ITD ne peut plus y constituer un indice de localisation et pour des valeurs d'ITD augmentant jusqu'à des valeurs supérieures à celles normalement possibles dans le cas d'une latéralisation totale (90°). Les résultats montrent que l'effet de l'ITD sur la sonie n'est pas significatif au-delà de 500 Hz. À cette fréquence, la sonie augmente d'abord avec l'ITD puis diminue lorsque celle-ci dépasse la valeur correspondant à un azimut de 90°.

1 Introduction

La sonie induite par un stimulus sonore peut varier en fonction de la localisation de sa source. Ce phénomène a pu être mis en évidence en diffusant des bandes de bruit sur des hauts-parleurs disposés tout autour d'un auditeur dans une chambre anéchoïque [1, 2]. Ainsi, un bruit de largeur de bande égale à un tiers d'octave centré à 5 kHz est perçu significativement plus fort si sa source émettrice se trouve sur le côté de l'auditeur ($\pm 90^\circ$) plutôt que dans son axe (0°). Cet effet, appelé sonie directionnelle, s'explique largement par les modifications physiques que subissent les ondes sonores dans leurs trajets jusqu'aux entrées des conduits auditifs externes.

Bien que majoritairement observé en hautes fréquences, où les pressions sonores aux oreilles de l'auditeur sont modifiées du fait de la présence de la tête, cet effet s'est révélé significatif dès 400 Hz [2] où l'ombre acoustique de la tête d'un auditeur est faible voire négligeable [3]. D'autres paramètres liés à la localisation de la source pourraient donc être impliqués dans le phénomène de sonie directionnelle. De récents travaux ont ainsi mis en évidence l'effet de la différence interaurale de temps (ITD) sur la sonie des sons purs en basse fréquence (200 et 400 Hz) à 40 phon [4]. Celui-ci a également été observé en présence d'une différence interaurale de niveau (ILD) contradictoire à l'ITD, indiquant que cet effet est dû à l'ITD elle-même et non à la localisation engendrée [5].

À des fréquences supérieures, le phénomène de sonie directionnelle est imputable aux modifications de la pression sonore aux oreilles de l'auditeur, non négligeables à partir de 500 Hz [3]. Cependant, même à 5000 Hz, ces différences ne suffisent pas à expliquer totalement les variations de la sonie en fonction de l'azimut [6]. Le but de la présente étude est donc d'observer un possible effet de l'ITD sur la sonie à des fréquences supérieures à celles précédemment étudiées, à partir de 500 Hz et jusqu'à 2000 Hz.

2 Protocole expérimental

2.1 Stimuli

Des sons purs de fréquences 500, 707, 1000, 1404 et 2000 Hz ont été latéralisés par des différences interaurales

de temps. Celles-ci étant dépendantes de la fréquence, la valeur correspondant à un angle d'incidence θ_{inc} de 90° a été calculée selon deux modèles d'ITD ; le modèle de Woodworth [9] :

$$\text{ITD} = \frac{a}{c_0}(\theta + \sin \theta_{inc}) \quad (1)$$

et le modèle de Kuhn [10] :

$$\text{ITD} = \frac{3a}{c_0} \sin \theta_{inc} \quad (2)$$

où $a = 8,75$ cm désigne le rayon standard de la tête et $c_0 = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ la vitesse du son dans l'air. Pour des sons purs, l'Eq. (2) permet une bonne estimation de l'ITD jusqu'à 800 Hz alors que l'Eq. (1) le permet au-delà de 1500 Hz [11]. Pour $\theta_{inc} = 90^\circ$, $\text{ITD} = 662 \mu\text{s}$ d'après le modèle de Woodworth et $\text{ITD} = 772 \mu\text{s}$ d'après le modèle de Kuhn. Des valeurs d'ITD inférieure (607 μs), intermédiaire (717 μs) et supérieure (827 μs) à ces deux valeurs ont également été étudiées, ainsi qu'une ITD nulle pour la comparaison. Une valeur d'ITD de 827 μs est ainsi notablement supérieure à celle normalement possible dans le cas d'une latéralisation totale (90°). Ces différences interaurales (6 valeurs possibles) ont été introduites entre les canaux droit et gauche de sons purs initialement diotique. Les stimuli ont été présentés aux auditeurs sur un casque Sennheiser HD 650 (circum-aural ouvert). Les éventuels mouvements de la tête de l'auditeur n'étaient pas compensés. La détermination de l'azimut à partir de l'ITD est possible sans ambiguïté tant que la période est inférieure au double de l'ITD maximale possible, ce qui correspond à une fréquence d'environ 725 Hz, et même jusqu'au double de cette fréquence, soit environ 1500 Hz, si des mouvements de la tête ou de la source sont possibles [3]. Dans la présente étude, l'ITD ne peut donc plus constituer un indice de localisation pour $f = 2000 \text{ Hz}$, et peut se révéler ambiguë pour $f = 1000 \text{ Hz}$ et $f = 1404 \text{ Hz}$.

Les stimuli étaient à égaliser en sonie avec des références diotiques donc le niveau de sonie a été fixé à 40 phon en plaçant le casque de test sur une tête artificielle (Neumann KU 100) dont les microphones sont situés à l'entrée du conduit auditif bloqué. Le niveau de pression sonore a tout d'abord été fixé à 94 dB SPL à 1000 Hz sur chaque oreille. Puis partant de ce point, le niveau a été ajusté pour chaque fréquence testée en suivant la courbe à 40 phon définie par la norme ISO 226 [7] et en prenant en compte l'influence de la tête artificielle [8]. Les niveaux de pression sonore

au centre de la tête et à l'entrée du conduit auditif bloqué correspondants à chacune de ces fréquences sont indiqués dans le Tableau 1.

TABLEAU 1 – Niveau de pression L en dB SPL en fonction de la fréquence f à 40 phon, au centre de la tête [7] et à l'entrée du conduit auditif (bloqué) de la tête artificielle KU 100 [8].

f (Hz)	L (dB SPL)	
	ISO 226 [7]	KU 100 [8]
500	43,0	41,5
707	40,6	39,9
1000	40,0	40,8
1414	42,6	42,7
2000	39,2	38,9

La durée de chaque stimulus a été fixée à 1,6 s, une rampe sinusoïdale de 100 ms étant appliquée à son attaque et à son extinction.

2.2 Procédure

Les égalisations de sonie ont été obtenues selon une procédure adaptative à 2 intervalles à choix forcé (2I2AFC), suivant une règle “1-up 1-down” convergeant vers le point d’égalité subjective (sonie égale). Cette procédure est similaire à celles ayant révélé un effet significatif de l’ITD sur la sonie dans les précédentes études [4, 5]. À chaque essai, un son test et un son de référence de durée 1,6 s chacun ont été présentés de manière aléatoire et séparés par une pause de 500 ms. La tâche du sujet consistait à indiquer lequel de ces deux sons était perçu comme le plus fort, indépendamment de toute autre différence qu'il pourrait percevoir.

Le niveau de départ de chaque stimulus à égaliser a été aléatoirement fixé 10 dB au-dessus ou en-dessous du niveau de la référence (défini à l'entrée du conduit auditif bloqué dans le Tableau 1), de manière à produire des différences de sonie clairement perceptibles au début de la tâche d'égalisation. Le niveau du son test, contrôlé par la procédure adaptative, était diminué d'une certaine valeur si l'auditeur l'avait jugé plus fort que la référence et diminué de la même valeur si l'auditeur l'avait jugé plus faible. Le pas a été initialement fixé à 4 dB, puis réduit à 1 dB après deux inversions (changement de direction dans la procédure d'égalisation). La procédure d'égalisation se poursuivait ainsi jusqu'à la huitième inversion, et le point d'égalité subjective était alors déterminé en faisant la moyenne des niveaux obtenus aux six dernières. La procédure complète d'égalisation d'un son test, démarrant à ± 10 dB autour du niveau de référence et s'arrêtant à la huitième inversion, sera désignée par “séquence adaptative” dans la suite de cet article.

Les 30 conditions expérimentales (6 ITD et 5 fréquences) ont été aléatoirement numérotées de 1 à 30 pour chaque sujet. Afin d'éviter toute stratégie de réponse, les 30 séquences adaptatives ont ensuite été intercalées essai par essai afin de mélanger les ITD, fréquences et niveaux de départ. Du point de vue du sujet, chaque session est ainsi apparue comme une suite de comparaisons par paire sans rapport les unes avec les autres. Afin de réduire la fatigue de l'auditeur en fin de session, où les comparaisons par paires concernent spécifiquement de faibles différences de niveau, seules les séquences adaptatives portant un numéro impair (aléatoirement attribué en début de session) étaient initialement démarrées. Les séquences adaptatives portant un numéro pair ne démarraient qu'après que toutes les séquences impaires aient passé leur quatrième inversion, afin que l'auditeur ne soit pas confronté aux dernières inversions (comparaison sur de petites différences de sonie) des 30 séquences à la fois.

Le test, d'une durée moyenne d'environ 1 h, s'est déroulé dans une cabine audiométrique. Un pré-test de 3 min permettait au sujet de se familiariser avec la tâche et l'interface de réponse. Le sujet avait pour consigne initiale de placer confortablement le casque HD 650 sur ses oreilles et de ne pas modifier cette position une fois l'expérience démarrée afin de ne pas modifier le couplage entre le casque et les oreilles de l'auditeur [12, 13].

Vingt étudiants ingénieurs du son de l'Université de Brest (Licence et Master Image & Son) ont participé à cette expérience pour laquelle ils ont été rémunérés. Les sujets (6 femmes et 14 hommes) présentaient des seuils d'audition normaux d'après un audiogramme passé dans le mois précédent le test. Aucun d'eux n'avait d'expérience particulière des tests auditifs en laboratoire.

2.3 Résultats

Pour chaque fréquence, une analyse de variance à mesures répétées a été effectuée pour évaluer l'effet de l'ITD sur les égalisations de sonie. Le point d'égalité subjective est ici décrit par la différence entre le niveau égalisé et le niveau de référence (voir Tableau 1 pour les valeurs en dB SPL correspondantes).

À 500 Hz, l'effet de l'ITD sur la sonie s'est révélé significatif ($F(5, 95) = 3,041 ; p = 0,014$). Comme l'indique la Figure 1, le point d'égalité subjective obtenu pour une ITD nulle est significativement différent (d'après le test LSD de Fisher) de celui obtenu pour $607 \mu\text{s}$ ($p < 0,01$), $717 \mu\text{s}$ ($p < 0,05$) et $772 \mu\text{s}$ ($p < 0,001$). Ces résultats sont globalement en accord avec ceux obtenus à 200 et 400 Hz lors de précédentes études [4, 5] qui indiquaient que le point d'égalité diminuait avec l'ITD jusqu'à devenir significativement plus faible pour les valeurs $\pm 669 \mu\text{s}$ et $\pm 772 \mu\text{s}$.

En revanche, pour une ITD de $827 \mu\text{s}$, le point d'égalité subjective n'est pas significativement différent de celui obtenu pour une ITD nulle ($p = 0,057$). Cette différence interaurale de temps est supérieure à la valeur maximale

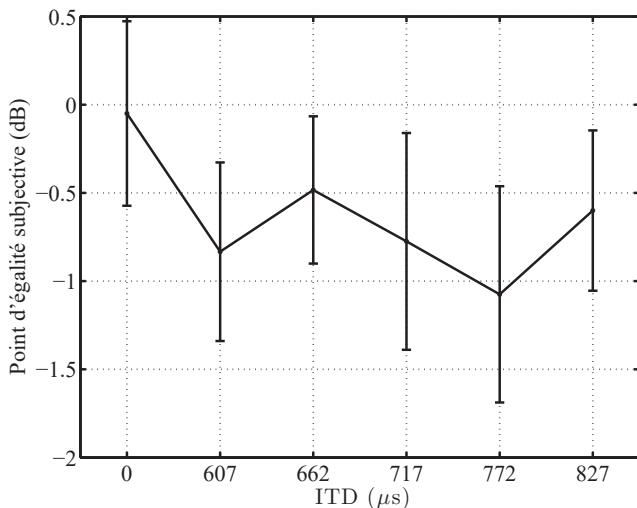


FIGURE 1 – Point d'égalité subjective moyen (et intervalle de confiance à 95%) en fonction de l'ITD à 500 Hz.

possible à cette fréquence d'après l'Eq. (2). De précédentes études ont ainsi montré que la sensation de latéralité augmentait avec la différence interaurale de temps (ou de phase) jusqu'à une certaine valeur critique puis que l'image sonore perçue avait ensuite tendance à revenir vers le centre et donner lieu à la perception d'une image diffuse voire de deux images distinctes lorsque la différence interaurale de temps était supérieure à un quart de période [14] ou proche de la demi-période [15]. À 500 Hz, une ITD de 827 μ s pourrait alors entraîner la perception d'une image diffuse voire de deux images et des mécanismes plus complexes pourraient alors être impliqués dans la sonie globale [16].

L'effet de l'ITD sur la sonie ne s'est révélé significatif à aucune des autres fréquences testées :

- $F(5, 95) = 1,592 ; p = 0,170$ à 707 Hz,
- $F(5, 95) = 0,656 ; p = 0,657$ à 1000 Hz,
- $F(5, 95) = 1,613 ; p = 0,164$ à 1404 Hz,
- $F(5, 95) = 0,435 ; p = 0,823$ à 2000 Hz.

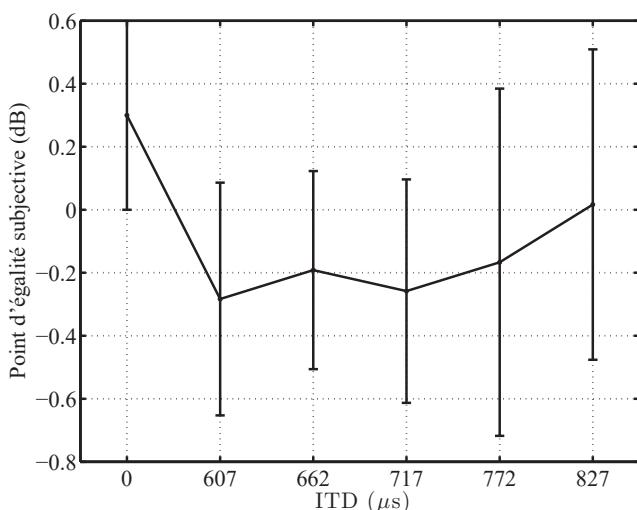


FIGURE 2 – Point d'égalité subjective moyen (et intervalle de confiance à 95%) en fonction de l'ITD à 707 Hz.

À ces fréquences, et comme l'indiquent les Figures 2, 3,

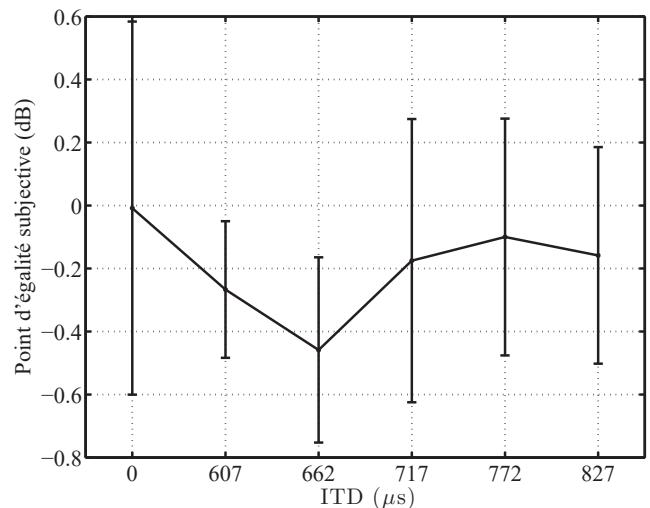


FIGURE 3 – Point d'égalité subjective moyen (et intervalle de confiance à 95%) en fonction de l'ITD à 1000 Hz.

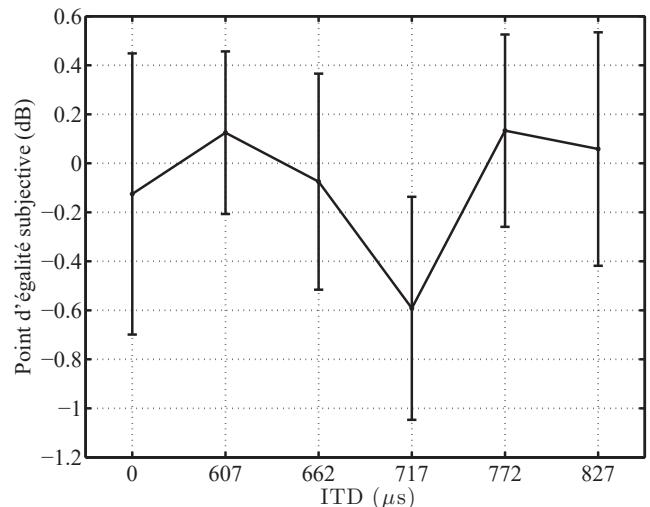


FIGURE 4 – Point d'égalité subjective moyen (et intervalle de confiance à 95%) en fonction de l'ITD à 1404 Hz.

4 et 5, les différences entre les points d'égalité subjective moyens sont nettement plus faibles qu'à 500 Hz. La différence maximale observée entre un point d'égalité subjective moyen obtenu pour une ITD non nulle et le point d'égalité subjective moyen de référence (ITD nulle) est comprise 0.4 et 0.6 dB. Cette différence est alors inférieure ou au mieux égale au seuil différentiel d'intensité pour ces fréquences [17], expliquant vraisemblablement la non-significativité de cet effet.

3 Conclusion

Cette étude confirme l'effet de l'ITD sur la sonie observé précédemment sur des sons purs de fréquence 200 et 400 Hz. Cet effet se révèle significatif à 500 Hz mais pas aux fréquences supérieures, y compris à 707 Hz où l'ITD permet néanmoins la localisation, ce qui confirme que l'effet observé est bien dû à l'ITD elle-même et non à la localisation induite. Ainsi, la contribution de l'ITD au phénomène de sonie directionnelle n'apparaît être significative que jusqu'à 500 Hz et pas au-delà, les variations de la sonie en fonction

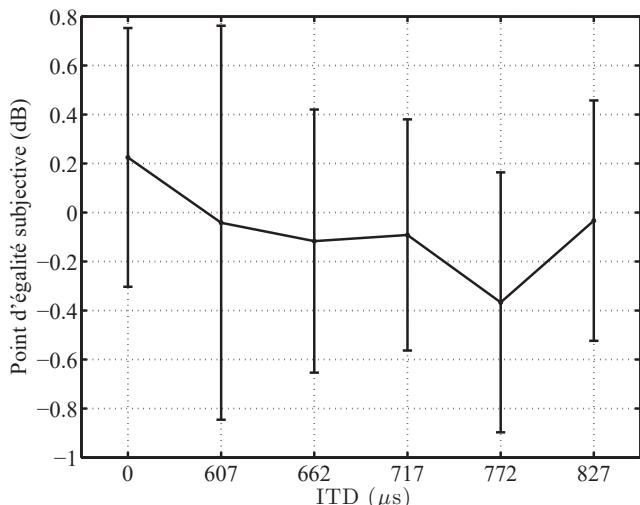


FIGURE 5 – Point d'égalité subjective moyen (et intervalle de confiance à 95%) en fonction de l'ITD à 2000 Hz.

de l'azimut qui pourraient être observées à des fréquences supérieures seraient alors dues à des différences interaurales de niveau qui ne sont plus négligeables au-delà de 500 Hz [3].

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le personnel et les étudiants de la formation “Image & Son Brest” de l’Université de Bretagne Occidentale pour leur concours à cette étude.

Références

- [1] D. W. Robinson and L. S. Whittle, The loudness of directional sound fields, *Acustica* **10**, 74–80 (1960).
- [2] V. P. Sivonen and W. Ellermeier, Directional loudness in an anechoic sound field, head-related transfer functions, and binaural summation, *Journal of the Acoustical Society of America* **119**, 2965–2980 (2006).
- [3] B. C. J. Moore, Space perception, in *An introduction to the Psychology of Hearing*, Brill, Leiden (2012).
- [4] V. Koehl and M. Paquier, Loudness of low-frequency pure tones lateralized by interaural time differences, *Journal of the Acoustical Society of America* **137**, 1040–1043 (2015).
- [5] V. Koehl, M. Paquier and E. Hendrickx, Effects of interaural differences on the loudness of low-frequency pure tones, *Acta Acustica united with Acustica* **101**, 1168–1173 (2015).
- [6] B. C. J. Moore and B. R. Glasberg, Modeling binaural loudness, *Journal of the Acoustical Society of America* **121**, 1604–1612 (2007).
- [7] ISO 226, *Acoustics – Normal equal-loudness-level contours*, International Organization for Standardization, Geneva (2003).

- [8] B. Bernschütz, A spherical far field HRIR/HRTF compilation of the Neumann KU 100, in *Proceedings of AIA-DAGA joint Conference*, Merano, 592–595 (2013).
- [9] R. S. Woodworth, Hearing, in *Experimental psychology*, Holt, New York (1938).
- [10] G. F. Kuhn, Model for the interaural time differences in the azimuthal plane, *Journal of the Acoustical Society of America* **62**, 157–167 (1977).
- [11] N. L. Aaronson and W. M. Hartmann, Testing, correcting, and extending the Woodworth model for interaural time difference, *Journal of the Acoustical Society of America* **135**, 817–823 (2014).
- [12] M. Paquier and V. Koehl and B. Jantzen, Discriminability of the placement of supra-aural and circumaural headphones, *Applied Acoustics* **93**, 130–139 (2015).
- [13] M. Paquier, V. Koehl and B. Jantzen, Effect of headphone position on absolute threshold measurements, *Applied Acoustics* **105**, 179–185 (2016).
- [14] W. A. Yost, Lateral position of sinusoids presented with interaural intensive and temporal differences, *Journal of the Acoustical Society of America* **70**, 397–409 (1981).
- [15] B. M. Sayers, Acoustic-image lateralization judgments with binaural tones, *Journal of the Acoustical Society of America* **36**, 923–926 (1964).
- [16] S. McAdams, M. C. Botte and C. Drake, Auditory continuity and loudness computation, *Journal of the Acoustical Society of America* **103**, 1580–1591 (1998).
- [17] H. Fletcher, Minimum perceptible changes in frequency and sound pressure level, in *Speech and Hearing in Communication*, Van Nostrand, Princeton (1953).