



## **Conception et caractérisation d'un haut-parleur à membrane annulaire encastrée sur une enceinte torique**

B. Crettaz, P. Marmaroli et H. Lissek

Ecole Polytechnique de Lausanne, EPFL STI IEL LEMA ELB 033 - Station 11, CH-1015 Lausanne,  
Suisse

[patrick.marmaroli@epfl.ch](mailto:patrick.marmaroli@epfl.ch)

Nous nous intéressons au dimensionnement d'un nouveau système électro-acoustique directif large-bande pour la création de zones d'écoutes personnalisées. L'idée étant de pouvoir diffuser du contenu audio au-dessus d'une zone d'écoute prédéfinie, tout en garantissant une réjection significative au-delà de cette zone, de sorte à ne pas gêner le voisinage alentour. Les solutions existantes à l'heure actuelle peinent à réunir les deux critères fondamentaux que requièrent la plupart des applications directes et que sont une directivité tranchée et une haute qualité sonore. Dans ce papier, nous nous intéressons au développement et aux propriétés mécano-acoustiques d'un haut-parleur à membrane annulaire encastrée sur une enceinte torique. On sait que les transducteurs annulaires et les réseaux circulaires de transducteurs ont un facteur de directivité plus élevé que les membranes pleines. C'est une des raisons pour lesquelles cette topologie est largement utilisée en imagerie médicale, domaine qui nécessite la génération d'ondes ultrasoniques très directives. Mais qu'en est-il de leur utilisation dans la bande de fréquence audible ? Ce papier expose nos premiers résultats (théoriques, de simulations et expérimentaux) concernant cette topologie.

## 1 Introduction

Cet article s'inscrit dans le cadre des recherches menées sur les "zones d'écoutes personnalisées". Une zone d'écoute personnalisée est une région de l'espace préalablement définie et au sein de laquelle une personne - ou un groupe de personnes - peut écouter un contenu audio avec un niveau relativement confortable tout en restant très peu perceptible, voire inaudible, pour une personne placée en dehors de cette région. La création de telles zones intéressent plusieurs types d'industries (muséale, hôtelière, touristique, commerciale etc.) et nécessite, en général, l'utilisation de systèmes de diffusion sonore directifs. Les trois types de systèmes directifs les plus plébiscités actuellement sont :

- les réseaux de haut-parleurs (planaires, linéaires, incurvés) : ils sont pilotés selon les principes de la formation de voie (beamforming), ils offrent une excellente réponse en fréquence dans l'axe principal mais peuvent nécessiter l'emploi d'un nombre important de transducteurs selon la directivité recherchée ;
- les réflecteurs paraboliques : un seul haut-parleur placé en leur foyer suffit à produire un contraste intéressant dans les médiums mais les basses fréquences ne sont pas focalisées, de plus, le réflecteur affecte la qualité de la restitution dans l'axe principal en produisant un "effet de tube" ;
- les réseaux de transducteurs ultrasons : ils focalisent l'onde sonore par le principe d'hétérodynage acoustique et figurent parmi les solutions les plus efficaces en terme de directivité mais leur bande passante très réduite ne les restreint qu'à diffuser du signal de parole uniquement.

Dans ce papier, nous étudions la faisabilité d'une nouvelle topologie de haut-parleur, à savoir, le haut-parleur à membrane annulaire encastrée sur une enceinte torique (appelé haut-parleur torique dans le reste du document), et évaluons ses performances sur le plan de la directivité et de la réponse en fréquence.

Les transducteurs annulaires, ainsi que les réseaux circulaires de transducteurs, sont principalement utilisés dans les domaines de l'imagerie médicale et de l'acoustique sous-marine. Ils permettent de réaliser des transducteurs ultrasoniques monochromatiques fortement directifs [1]. On retrouve cette topologie dans des sondes d'échographie, par exemple [2], ainsi que dans des systèmes sonars [3]. Notons que dans le domaine de l'imagerie médicale, il est courant d'utiliser des réseaux d'anneaux piézoélectriques

concentriques, ce qui permet d'élargir les bandes de fréquences utilisables [4]. De plus, l'utilisation de réseaux annulaires (agencement de portions d'anneaux piézoélectriques actionnés indépendamment) permet de modifier l'angle des faisceaux d'ultrasons [5].

Les premières études théoriques sur le rayonnement acoustique des membranes annulaires sont publiées par N.W. McLachlan dans le périodique "Annalen der Physik" en 1932 [6]. McLachlan donne des résultats plus développés concernant la directivité et la puissance rayonnée des anneaux vibrants dans son livre *Loud Speakers* [7], p. 107 et 128. En se basant sur les méthodes de McLachlan, A.S. Merriweather développe en 1969 l'expression analytique de l'impédance acoustique d'un piston annulaire disposé sur un écran infini [8]. Ce résultat est par la suite confirmé par W. Thompson, qui en 1971, utilise la méthode de C.J. Bouwkamp [9] consistant à intégrer le carré de la fonction de directivité sur un champ de valeurs complexes [10]. Ses travaux présentent des développements limités et des approximations numériques de l'impédance de rayonnement.

A notre connaissance, trois types de transducteurs audio des membranes annulaires : les haut-parleurs coaxiaux - popularisé dans les années quarante par Altec Lansing [11] et qui consiste à placer un tweeter (restituant les hautes fréquences) au centre d'une membrane plus importante (restituant les basses fréquences); les haut-parleurs à bouchon de phase - un dispositif semi-conique est placé au centre d'une membrane pour faire office de guide d'ondes ; Le résonateur en anneau - qui consiste en un radiateur passif en forme d'anneau positionné autour du haut-parleur principal [12, 13]. Certains autres haut-parleurs sont réalisés avec plusieurs membranes annulaires concentriques en forme de dôme [14, 15], avec un bouchon de phase en leur centre ou pour rejoindre une partie solide dans le centre du haut-parleur. Cette technique est utilisée pour les hautes fréquences, en particulier dans des systèmes de haute-fidélité, car elle permet d'améliorer la réponse en fréquence dans la partie haute du spectre. Quoi qu'il en soit, ce sont essentiellement pour des raisons pratiques que les systèmes précédemment décrits intègrent des membranes annulaires, mais leur objectif n'est pas d'accroître leur directivité. En outre, on peut noter que la surface du tweeter central - ou la prise de phase - est généralement faible par rapport au haut-parleur externe. Le rapport entre le rayon intérieur et le rayon extérieur le plus grand de haut-parleur est souvent faible (typiquement inférieur à 0.5), ce qui permet généralement de le considérer comme un piston standard.

Dans cet article, nous présentons nos premiers résultats de simulations et de mesures suite à la création d'un prototype de haut-parleur torique. Dans la section 2 nous rappelons les résultats théoriques essentiels concernant le rayonnement des anneaux. Dans la section 3, nous exposons nos résultats de simulations d'anneaux oscillants dans différentes conditions d'encastrement. Enfin, une caractérisation, en terme de directivité et de réponse fréquentielle, de notre prototype de haut-parleur torique est proposée en section 4. Ces résultats sont confrontés avec un réseau circulaire de haut-parleur de même diamètre. Une conclusion sur cette étude et sur le travail restant est proposée en section 5.

## 2 Rayonnement des réseaux circulaires et des membranes annulaires

Dans cette section, nous rappelons quelques résultats connus sur la directivité et l'impédance de rayonnement des membranes annulaires.

### 2.1 Calcul des directivités

La fonction de directivité d'un réseau circulaire théorique (constitué d'une infinité de monopôles) s'exprime par [16]

$$D_{0,rc} = J_0(ka \sin(\theta)) \quad (1)$$

Où  $a$  est le rayon du réseau circulaire,  $k$  le nombre d'onde,  $\theta$  l'angle de rayonnement avec l'axe normal et  $J_0$  est la fonction de Bessel de première espèce à l'ordre 0. D'autre part, la directivité d'un anneau oscillant sur écran infini est donnée par la formule suivante [7] :

$$D_{0,ao} = \frac{2J_1(ka \sin(\theta))}{ka \sin(\theta)} - \frac{b^2}{a^2} \frac{2J_1(kb \sin(\theta))}{kb \sin(\theta)} \quad (2)$$

où  $a$  est le rayon externe de l'anneau,  $b$  le rayon interne et  $J_1$  la fonction de Bessel de première espèce à l'ordre 1.

La directivité exprimée par l'équation (2) peut être vue comme la différence entre la directivité d'un disque oscillant de rayon  $a$ , et celle d'un disque de rayon  $b$ . De plus, lorsque  $b$  tend vers  $a$ , on peut montrer que la directivité d'un anneau tend vers celle d'un réseau circulaire exprimé par l'équation (1).

### 2.2 Impédance acoustique d'un anneau sur écran infini

Les résultats des travaux de Merriweather et Thompson [8, 10], en particulier en ce qui concerne la résistance de rayonnement, confirment la faisabilité d'un haut-parleur constitué d'une membrane annulaire. La dépendance générale de l'impédance acoustique de rayonnement aux rayons et à la fréquence, telle qu'établie par Thompson, est donnée par l'équation :

$$Z_{ar} \approx \frac{1}{2}(ka)^2 \left[ 1 - \left( \frac{b}{a} \right)^2 \right] + j \frac{8}{3\pi}(ka) \frac{1 + \left( \frac{b}{a} \right)^3 - \frac{3\pi}{4} \left( \frac{b}{a} \right)^2}{1 - \left( \frac{b}{a} \right)^2} \quad (3)$$

On constate que la résistance de rayonnement d'un anneau oscillant sur écran infini croît en  $f^2$  jusqu'à la limite théorique du rayonnement des disques,  $ka \approx 1.4$ , tout comme un disque de même rayon. Avec une membrane constituant un résonateur mécanique dont l'impédance décroît en  $f^{-1}$  sur cette zone, on peut compter, comme pour un haut-parleur traditionnel, sur une zone de réponse fréquentielle relativement plate sur une large bande de fréquence [16], p 534 et 535. Une membrane annulaire aura cependant des limitations en hautes fréquences proches de celles d'un haut-parleur classique de même diamètre (le premier plateau de la résistance de rayonnement intervient pour une valeur de  $ka$  équivalente). Des simulations COMSOL confirment ce phénomène comme le montre la figure 1.

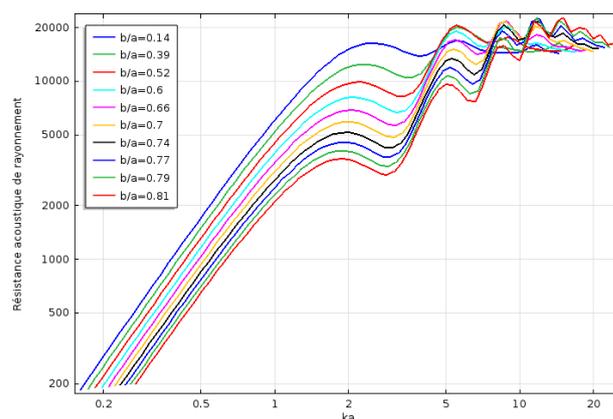


FIGURE 1 – Résultats de nos simulations concernant la résistance de rayonnement (en Pa.s/m) d'un anneau oscillant sur écran infini en fonction de  $ka$ . Chaque tracé correspond à une valeur particulière du rapport des rayons internes et externes  $b/a$  (de 0.14 à 0.81) avec une surface de membrane fixée à  $0.094 \text{ m}^2$ .

## 3 Résultats des simulations

Dans cette section, nous discutons des caractéristiques du rayonnement des anneaux dans trois situations de montage : sur un écran infini (la partie centrale de l'anneau étant elle aussi écartée), sur une enceinte cylindrique et sur une enceinte torique. Ces simulations par éléments finis ont été effectuées au moyen du logiciel COMSOL, en utilisant la librairie "acoustic structure interaction", sur un modèle 2D en révolution circulaire.

Les résultats de simulations concernant la directivité de ces montages à 1kHz sont présentés dans la figure 2. Nous constatons globalement sur l'ensemble des simulations qu'une membrane annulaire montée sur une enceinte torique possède un lobe principal légèrement plus étroit que lors du montage sur une enceinte standard (contractile), mais possède des lobes secondaires plus importants. Le montage sur enceinte cylindrique présente la directivité la plus avantageuse, mais l'absence de trou central interdit leur intégration dans un réseau end-fire.

En ce qui concerne la bande passante dans l'axe principal, nos simulations montrent que celle-ci s'étend relativement loin dans l'aigu. L'augmentation du facteur de directivité avec la fréquence permet en effet de compenser l'effet du décroissement de la puissance rayonnée par la source au-delà

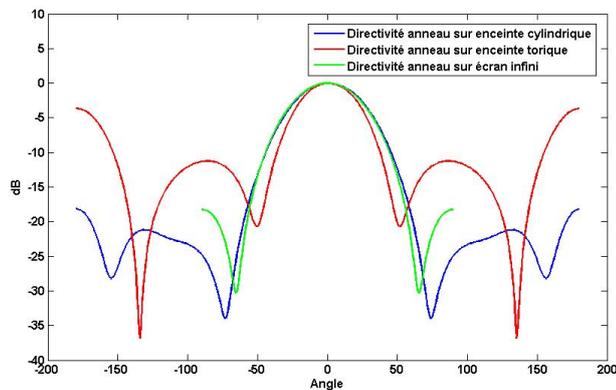


FIGURE 2 – Directivité d'un anneau oscillant et encastré sur une enceinte cylindrique (bleu), torique (rouge) et un écran infini (vert) à 1kHz et pour  $b/a$  valant 0.62.

de la limite standard donnée par le rayon du diaphragme. La comparaison est très marquée lors de la simulation de ce dispositif sur écran infini. Ce phénomène s'observe sur tous les types de montages, et est particulièrement visible lorsqu'on simule la réponse de l'anneau sur un écran infini, comme le montre la figure 3. Cette caractéristique se vérifie en pratique (voir section 4), mais n'a pas encore été analysée théoriquement.

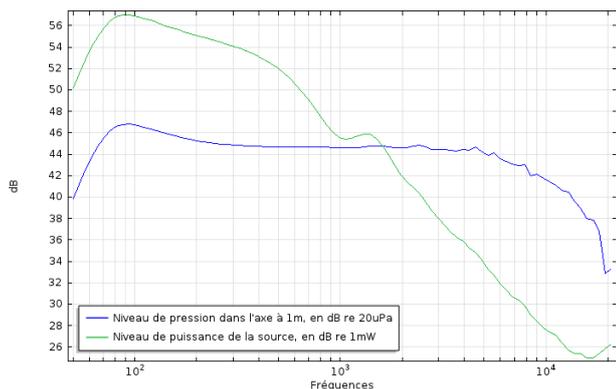


FIGURE 3 – Comparaison entre la puissance totale rayonnée (en dBm) et le niveau de pression (en dB SPL) dans l'axe principal du rayonnement, à 1m, pour un anneau de rayons  $a = 20$  cm et  $b = 10$  cm encastré sur un écran infini.

## 4 Construction et caractérisation d'un prototype

### 4.1 Dimensionnement du prototype

Ayant constaté que le montage de l'anneau sur enceinte torique possède un lobe principal de directivité relativement étroit, et dans la mesure où cette topologie permet un arrangement en réseau end-fire, un prototype de haut-parleur annulaire sur enceinte torique close a été réalisé (figure 4).

Les dimensions générales de ce prototype ont fait l'objet d'un compromis entre l'encombrement, la directivité et la facilité de réalisation. Le rayon interne de la membrane mesure 19 cm, et le rayon interne 13.5 cm. La profondeur de l'enceinte a été fixée à 10 cm. Le volume de l'enceinte est de 8.3 litres.

Afin de repousser au maximum les modes de résonance de la membrane et de tirer le meilleur profit de la réponse dans l'aigu de l'anneau, nous avons opté pour une membrane de composite carbone/nid d'abeille entraînée par huit transducteurs HiWave HIAX25C10-8.

Les paramètres mécaniques du haut-parleur sont issus de simulations COMSOL. Les paramètres de Thiele & Small [17] ont ensuite été déduits des paramètres mécaniques simulés et des données techniques fournies par le fabricant des transducteurs. Ces paramètres sont donnés dans le tableau 1.

TABLEAU 1 – Paramètres du haut-parleur torique réalisé

Description	Symbole	Valeur	Unité
Volume arrière	$V_b$	$8.3e^{-3}$	$m^3$
Compliance de l'enceinte	$C_{ab}$	$5.85e^{-8}$	$m^3/Pa$
Rapport compliances	$\alpha$	7.8	1
Fréquence de résonance	$f_c$	215.2	Hz
Compliance totale	$C_{ac}$	$5.18e^{-8}$	$m^3/Pa$
Facteur de qualité électrique	$Q_{ec}$	1.06	1
Facteur de qualité total	$Q_{tc}$	1.0	1
Rendement de référence	$\eta_c$	3.33	%
Fréquence de coupure	$f_3$	168.7	Hz

Du fait d'un volume arrière relativement faible vis-à-vis de la surface de la membrane, la fréquence de coupure grave de notre prototype reste élevée. Nul doute que des fréquences plus graves pourraient être correctement restituées avec un volume arrière plus important.

### 4.2 Réponse fréquentielle et directivité

Nous confrontons la réponse fréquentielle et la directivité de notre prototype à celles d'un réseau circulaire de huit haut-parleurs Tang Band T1-1828s dont les membranes sont disposés sur un cercle de même rayon que celui des transducteurs entraînant la membrane, soit 16 cm (figure 5). Les deux types de mesures (réponse en fréquence et directivité) se déroulent en chambre anéchoïque pour les deux systèmes. Chaque système est positionné sur une table tournante évoluant de  $0^\circ$  à  $360^\circ$  par pas de deux degrés. Le microphone de mesure est placé à deux mètres de l'axe de rotation de la table tournante, réglé à la hauteur du centre du système mesuré.

Les deux réponses fréquentielles sont représentées

dans la figure 6. La bande de fréquence à  $\pm 5$  dB du haut-parleur torique, respectivement du réseau circulaire, s'étend de 110 Hz à 6.4 kHz, respectivement de 160 Hz à 9 kHz, et la limite aigue à -10 dB s'étend jusqu'à 15 kHz environ dans les deux cas. Ceci confirme les prévisions concernant l'étendue de la réponse fréquentielle des anneaux dans l'aigu, et la possibilité d'exploiter cette topologie de haut-parleur pour la restitution sonore dans le domaine audio large-bande. De plus, on note qu'un haut-parleur torique autorise une meilleure restitution des basses fréquences que les haut-parleurs de petite taille utilisés pour créer le réseau circulaire.



FIGURE 4 – Prototype de haut-parleur torique.



FIGURE 5 – Réseau circulaire de haut-parleur.

Les directivités à 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz et 8000 Hz des deux systèmes sont représentées sur la figure 7. On constate que les deux topologies donnent des résultats globalement similaires, même si la directivité du réseau circulaire est légèrement plus marquée que celle du haut-parleur torique. Ce phénomène est en partie dû au fait que les haut-parleurs utilisés, montés par le constructeur sur des enceintes à radiateur passif, possèdent déjà un facteur de directivité non négligeable.

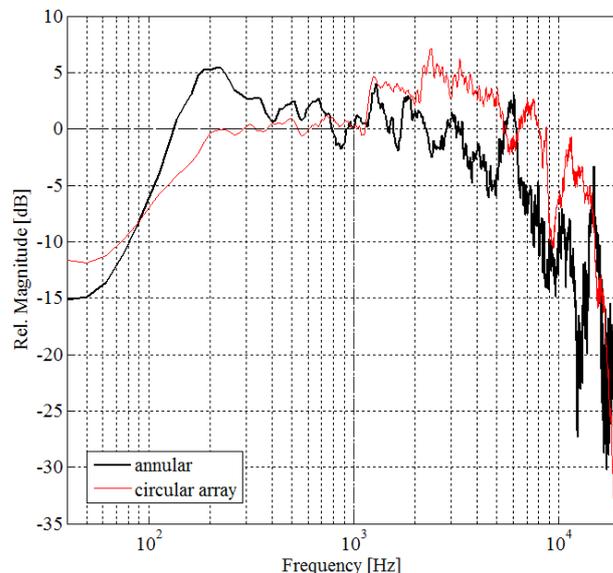


FIGURE 6 – Réponse fréquentielle dans l'axe principal du haut-parleur torique (noir) et du réseau circulaire de même diamètre (rouge).

## 5 Conclusion

Cette étude a permis de confirmer la faisabilité d'un transducteur électro-acoustique de type annulaire pour une restitution sonore directive et large bande. Les directivités obtenues avec notre prototype sont sensiblement les mêmes qu'avec un réseau circulaire de 8 haut-parleurs de même diamètre. Néanmoins, la version annulaire permet une restitution plus fidèle des basses fréquences. Les résultats issus de cette première étude laissent entrevoir des possibilités intéressantes dans le domaine de la création d'espaces sonores différenciés, et la maîtrise des environnements sonores. Nous comptons à présent développer d'autres prototypes et évaluer les performances d'un réseau end-fire de haut-parleurs toriques vis-à-vis des spécificités requises pour la création de zone d'écoute personnalisées.

## Références

- [1] C. Burckhardt, P.-A. Grandchamp, and H. Hoffmann, "Focusing ultrasound over a large depth with an annular transducer - an alternative method.," *IEEE transactions on sonics and ultrasonics*, vol. SU-22, no. 1, pp. 11–15, 1975.
- [2] K. Shung and M. Zippuro, "Ultrasonic transducers and arrays," *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, vol. 15, pp. 20–30, nov 1996.
- [3] F. B. Charles, A. E. Granfors, and L. D. Loveless, "Unitary directional sonar transducer," jan 1971. US Patent 3,559,162.
- [4] B. W. Drinkwater and P. D. Wilcox, "Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation : A review," *NDT & E International*, vol. 39, pp. 525–541, oct 2006.
- [5] H. Masuyama, K. Mizutani, and K. Nagai, "Sound source with direction-variable beam using annular transducer array," in *In proceedings of IEEE*

- Ultrasonics Symposium*, vol. 2, pp. 1097–1100  
vol.2, Oct 2002.
- [6] N. W. Mc Lachlan, “Verteilung der schallstrahlung von kreisscheiben mit knotenlinien,” *Annalen der Physik*, vol. 407, no. 4, pp. 422–439, 1932.
- [7] N. W. Mc Lachlan, *Loud Speakers*. Clarendon Press, Oxford, 1934.
- [8] A. Merriweather, “Acoustic radiation impedance of a rigid annular ring vibrating in an infinite rigid baffle,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 10, pp. 369–379, 1969.
- [9] C. Bouwkamp, “Numerical computation of the radiation impedance of a rigid annular ring vibrating in an infinite plane rigid baffle,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 17, no. 4, pp. 499–508, 1971.
- [10] W. T. Jr., “The computation of self- and mutual-radiation impedances for annular and elliptical pistons using bouwkamp’s integral,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 17, no. 2, pp. 221 – 233, 1971.
- [11] G. L. Augspurger, “Theory, ingenuity, and wishful wizardry in loudspeaker systems, a half-century of progress?,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 77, no. 4, pp. 1303–1308, 1985.
- [12] A. F. Sykes, “Improvements in electrodynamic loudspeakers.” GB301437-A, may 1927.
- [13] J. Sahyoun, “Élément rayonnant acoustique comprenant une combinaison d’un haut-parleur audio et d’un élément rayonnant passif coaxiaux,” apr 2012. WO Patent App. PCT/US2011/055,843.
- [14] L. Goller, “Loudspeaker,” Nov. 20 2001. US Patent 6,320,972.
- [15] L. Goller, “Ring shaped membrane for an electro-acoustical loudspeaker,” jul 2012. US Patent App. 13/430,421.
- [16] M. Rossi, *Audio*. Electricité, Lausanne : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2007.
- [17] R. H. Small, “Closed-box loudspeaker systems,” *Journal of Audio Engineering Society*, vol. 20, no. 10, 1972.

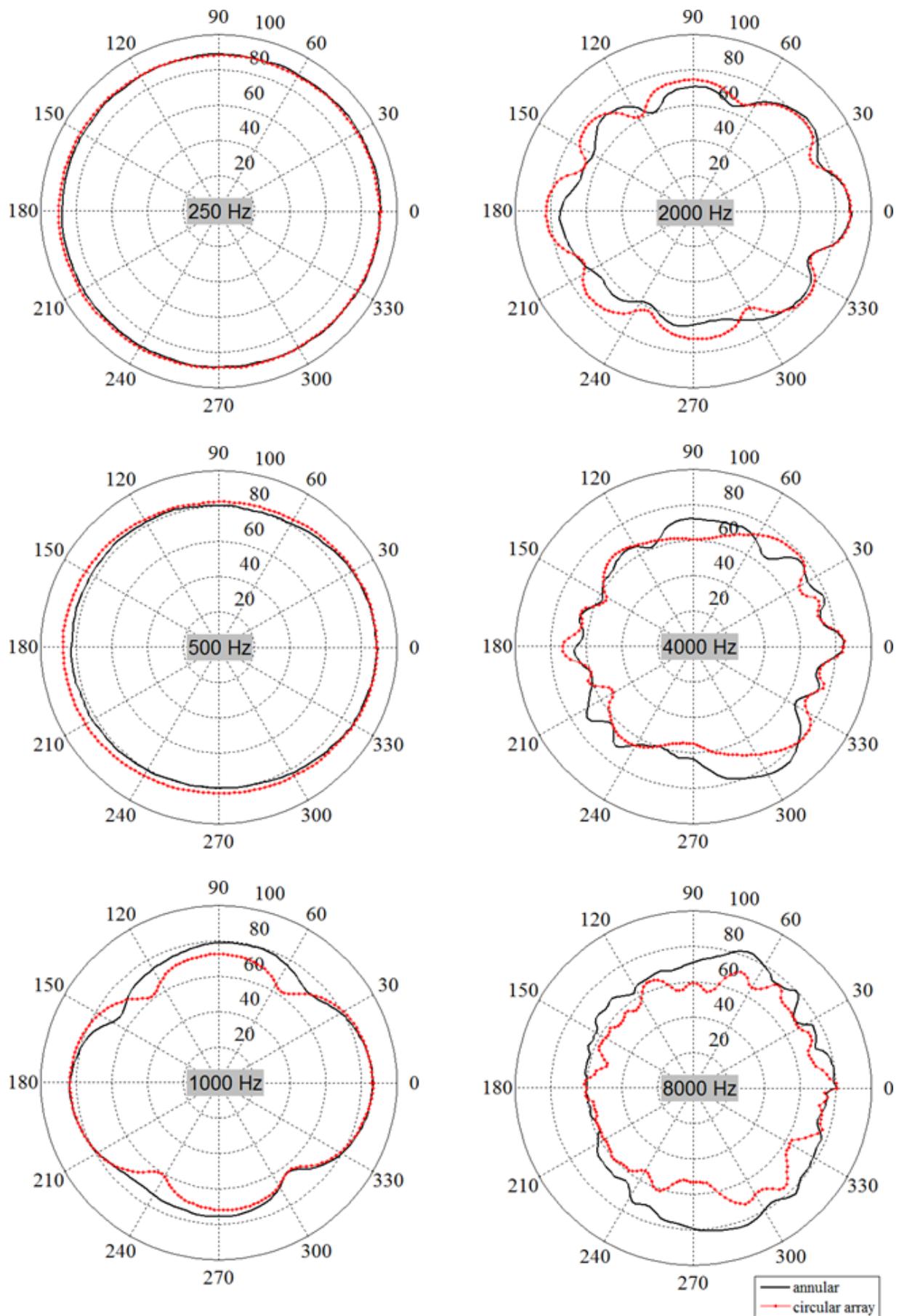


FIGURE 7 – Comparaison entre les directivités à quelques fréquences du haut-parleur torique et du réseau circulaire.