

Introduction

Les microphones Soundskrit sont une alternative directionnelle aux microphones à système micro-électromécanique (MEMS) omnidirectionnel pour l'électronique grand public, permettant une captation claire de la voix en réduisant le bruit de fond grâce à une conception intrinsèquement directionnelle. Alors que les concepteurs de systèmes sont actuellement habitués à utiliser des réseaux de plusieurs microphones omnidirectionnels pour imiter la directionnalité, les microphones directionnels inhérents ont plusieurs attributs clés qui les différencient et nécessitent des considérations de conception distinctes. Lors de la conception avec des microphones directionnels, il est nécessaire de comprendre comment le comportement de ces microphones s'écarte des microphones omnidirectionnels traditionnels et de s'assurer que les mesures de performance associées en tiennent compte avec précision. L'objectif de ce document est de mettre en évidence les caractéristiques uniques des microphones directionnels de Soundskrit ainsi que de décrire les méthodes appropriées pour caractériser et évaluer leurs performances.

Le microphone Soundskrit

Les microphones omnidirectionnels MEMS traditionnels et les microphones directionnels Soundskrit se composent d'un transducteur MEMS et d'un circuit intégré spécifique à l'application (ASIC) monté sur une carte de circuit imprimé (PCB) et sont encadrés par un couvercle métallique, comme illustré à

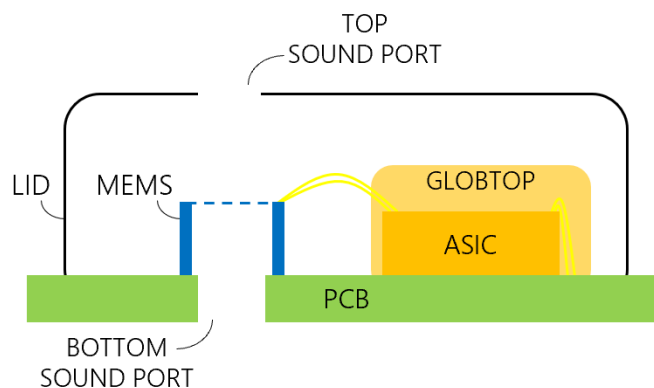


Figure 1: Schéma en coupe du microphone MEMS Soundskrit

la figure 1.

Contrairement aux microphones omnidirectionnels MEMS traditionnels, le microphone Soundskrit présente plusieurs caractéristiques uniques. En raison de la nature directionnelle du microphone Soundskrit, la sortie du microphone dépend de la direction d'où provient une onde sonore capturée. De plus, le microphone contient deux ports audio, un port audio supérieur dans le couvercle métallique et un port sonore inférieur dans le circuit imprimé du microphone. En fonction de la distance de la source sonore et de la nature du microphone testé, la sensibilité, la réponse en fréquence et d'autres caractéristiques de performance peuvent changer. Plusieurs de ces considérations sont décrites ci-dessous.

Indice de directivité moyen

La sensibilité d'un microphone directionnel changera en fonction de l'angle d'où provient l'onde sonore. La figure 2 illustre un exemple d'onde sonore arrivant à un microphone Soundskrit avec un angle de Θ .

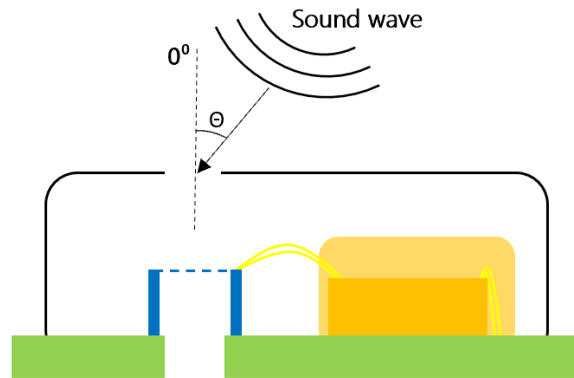


Figure 2: Onde sonore s'approchant d'un microphone Soundskrit depuis l'angle Θ

La sensibilité du microphone Soundskrit par rapport à l'angle d'entrée d'une onde sonore peut être représentée sous la forme d'un motif dipôle, ou « figure 8 ». En revanche, le microphone omnidirectionnel typique maintient une réponse égale, quelle que soit la direction entrante du son. Des représentations de ces diagrammes polaires sont présentées à la figure 3 ci-dessous.

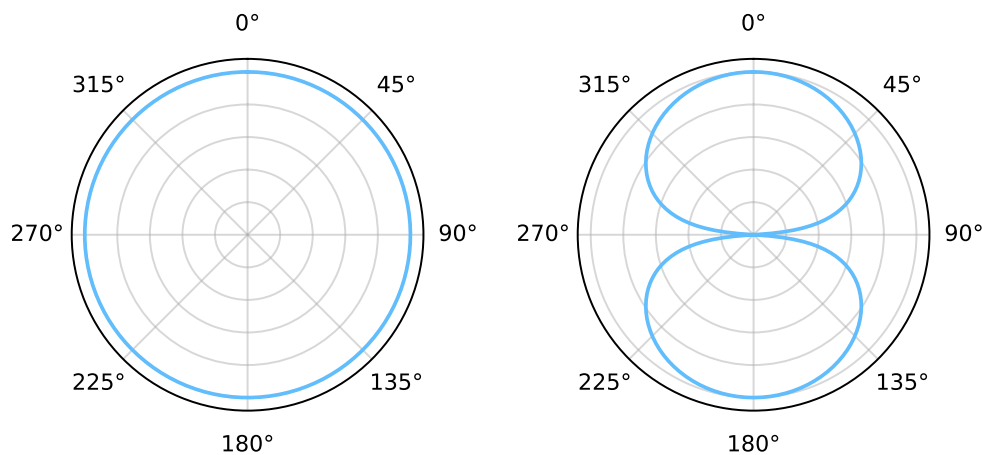


Figure 3: Diagramme polaire d'un microphone omnidirectionnel (à gauche) et d'un microphone Soundskrit (à droite)

Lors de l'évaluation des performances des microphones directionnels ou des réseaux de microphones, une mesure connue sous le nom d'indice de **directivité** (DI) est utilisée. L'indice de directivité mesure le rapport entre la sortie du microphone pour un son positionné directement devant le microphone ($= 0\theta^\circ$) et le son avec la même quantité de puissance acoustique totale provenant de toutes les directions de manière égale. L'indice de directivité est calculé à l'aide de l'équation ci-dessous :

$$DI = 4 \frac{\text{amplitude}(\theta = 0)^2 \left[\frac{V^2}{Pa^2} \right]}{\int_0^{2\pi} \text{amplitude}(\theta)^2 \left[\frac{V^2}{Pa^2} \right] |\sin \theta| d\theta}$$

Équation 1: Indice de directivité

Étant donné que les microphones omnidirectionnels mesurent le son de manière égale dans toutes les directions, ils ont un indice de directivité de 0 dB. En revanche, un microphone avec un directivité dipolaire idéale a un indice de directivité de 4,8 dB. En pratique, cela signifie que si une personne parle devant un microphone dipôle dans un environnement où le bruit diffus est diffus, ou le bruit qui se propage de manière égale dans toutes les directions, comme le bruit de babillage ou la réverbération, le microphone captera la parole de la personne avec une sensibilité supérieure de 4,8 dB à celle du bruit de fond diffus.

Il est courant d'imiter la directionnalité à l'aide de réseaux de plusieurs microphones omnidirectionnels. Bien que ces réseaux puissent se rapprocher d'un diagramme polaire dipôle, leur directionnalité change en fonction de la fréquence. Cependant, l'indice de directivité tel que décrit ci-dessus n'est calculé que pour une fréquence spécifique, le plus souvent sélectionnée dans la gamme vocale. Ce DI ne représente pas avec précision la directivité d'un réseau sur le spectre de fréquences qu'il est censé enregistrer. Pour mesurer la directivité sur l'ensemble du spectre audible, **de 20 Hz à 20 kHz, l'indice de directivité moyen** (est une moyenne logarithmiquement pondérée de l'indice de directivité à chaque fréquence de 20 Hz à 20 kHz. Si est un tableau avec un index stockant le DI pour chaque fréquence, l'indice de directivité moyen peut être calculé comme indiqué ci-dessous. $\overline{DI} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N W[k] DI[k]$

$$\overline{DI} = \frac{\sum_{k=1}^N W[k] DI[k]}{\sum_{k=1}^N W[k]}, \quad W[k] = \log_{10} \frac{k + 0.5}{k - 0.5}, \quad N = \text{length of } DI[k]$$

Équation 2: Indice de directivité moyen

L'indice de directivité moyen fournit une image de la directivité d'un microphone sur l'ensemble du spectre audible. Pour démontrer la différence entre les fréquences, la figure 4 montre l'indice de directivité en fonction de la fréquence pour les réseaux SKR0400 et omnidirectionnels de Soundskrit de deux microphones avec des espacements différents. Pour les réseaux, les sorties des deux microphones omnidirectionnels avec l'espacement spécifié ont été mesurées dans une configuration différentielle, ce qui signifie qu'un signal est soustrait de l'autre, pour se rapprocher d'un diagramme de directivité dipolaire correspondant à la SKR0400.

Comme le montre la figure 4, le SKR0400 présente un indice de directivité constant sur toute la gamme de fréquences. Un microphone dipôle idéal a une DI de 4,8, que le SKR0400 correspond à toute la gamme de fréquences audibles. En revanche, les réseaux de microphones omnidirectionnels typiques avec un espacement de 40 mm ne sont pas en mesure de maintenir la directivité sur toute la gamme de fréquences audibles. Cela se traduit par un indice de directivité moyen plus faible de 2,2 dB, contre 4,8 dB pour le SKR0400. Comme le montre la figure 4, la seule façon pour le réseau de microphones omnidirectionnels d'améliorer son indice de directivité moyen est de réduire l'espacement entre les microphones à environ 10 mm. Cependant, comme nous le verrons plus loin, cela se fait au prix d'une réduction significative du rapport signal/bruit. Notez que l'indice de directivité du réseau omnidirectionnel peut chuter à basse fréquence si les microphones omnidirectionnels ne sont pas parfaitement adaptés, comme on le voit avec la mesure du réseau de 40 mm, ce qui n'est pas un phénomène rare lorsqu'il s'agit de réseaux de microphones typiques utilisant des microphones MEMS avec des tolérances standard.

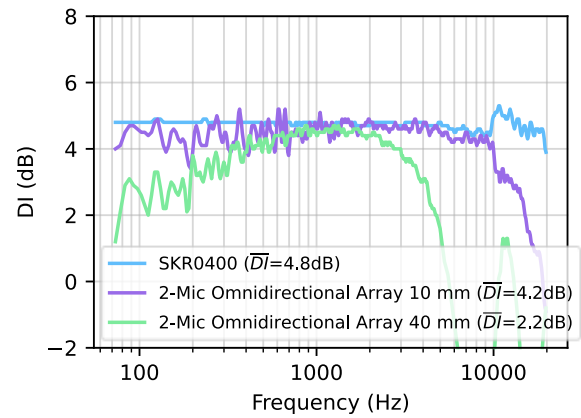


Figure 4: Indice de directivité en fonction de la fréquence d'un microphone Soundskrit et d'un réseau omnidirectionnel

L'effet de proximité

Lorsque vous examinez la sensibilité d'un microphone directionnel, il est important de tenir compte de la distance de la source sonore d , comme l'illustre la figure 5.

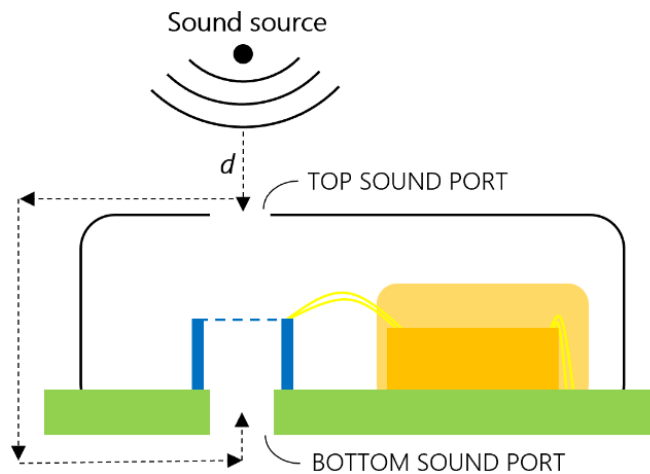


Figure 5: Source sonore à distance d'un microphone

Lorsqu'une source sonore génère une onde sonore qui se déplace vers un microphone directionnel, elle arrive d'abord au port sonore supérieur du microphone avec une certaine pression acoustique, puis atteint le port sonore inférieur du microphone avec une pression acoustique différente. Cette différence de pression acoustique provoque des fluctuations de l'air à l'intérieur du boîtier du microphone et excite le transducteur MEMS. La distance parcourue par l'onde sonore entre l'orifice sonore supérieur et

l'orifice sonore inférieur est appelée longueur du **trajet acoustique** et sera discutée plus en détail dans la section suivante.

Les microphones directionnels présentent un phénomène connu sous le nom d'effet de **proximité**. L'effet de proximité se produit lorsqu'une source sonore se trouve à proximité d'un microphone directionnel et se manifeste par une augmentation de la sensibilité aux basses fréquences. Ce phénomène est lié à la fois à la fréquence du son et à la distance entre le microphone et la source sonore. Près de la source, l'onde se déplace comme une onde sphérique tandis qu'au loin, elle se déplace comme une onde plane. La transition entre une onde sphérique et une onde plane se produit lorsque la distance de la source se rapproche de la longueur d'onde du son, qui est inversement proportionnelle à la fréquence. Parce que les sons à basse fréquence ont des longueurs d'onde plus longues, ils parcourent de plus grandes distances à partir de la source sonore sous forme d'ondes sphériques.

Un microphone directionnel réagit au mouvement de l'air en raison de la différence de pression entre ses ports sonores supérieur et inférieur. Dans une onde sphérique, la pression acoustique diminue plus rapidement avec la distance qu'avec une onde plane. Ainsi, un microphone directionnel voit une plus grande différence de pression entre ses ports lorsqu'il est exposé à une onde sphérique. C'est ce qui conduit à l'augmentation de la sensibilité pour les sons de basse fréquence près du microphone. La figure 6 montre un graphique de l'augmentation de la sensibilité d'un microphone Soundskrit en fonction de la distance d .

Comme le montre la figure 6, l'effet de proximité est plus important lorsque le microphone est proche de la source sonore. Par exemple, dans des produits tels que les microphones à perche, les écouteurs et les lunettes intelligentes, où le microphone se trouve à environ 10 cm ou moins de la bouche de l'utilisateur, le microphone peut voir une augmentation notable de la sensibilité aux basses fréquences. Ceci est souhaitable car il donne un son vocal complet qui rappelle les voix de la radio. Une fois que le microphone est placé à environ 1 m ou plus de la bouche de l'utilisateur, l'effet de proximité est généralement négligeable car les seules fréquences qui se propagent encore sous forme d'onde sphérique et créent une augmentation de la sensibilité sont inférieures à 100 Hz, où il n'y a pas d'énergie vocale significative. Il convient de noter que la figure 6 montre l'augmentation de la sensibilité d'un microphone directionnel (avec un faisceau dipôle) avec une longueur de trajet acoustique de 10 mm. Pour différentes longueurs de trajet acoustique, l'augmentation de la sensibilité peut varier par rapport aux valeurs représentées à la figure 6.

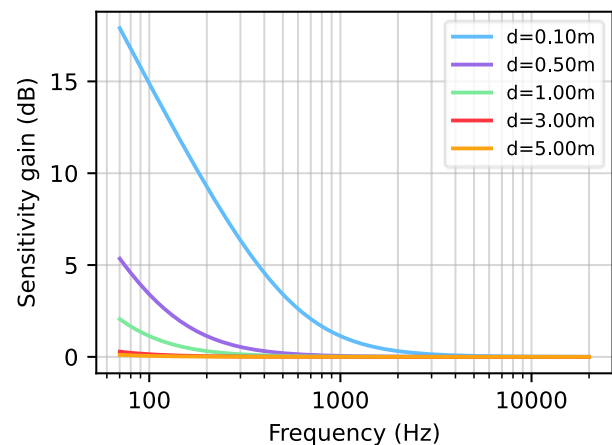


Figure 6: Sensibilité du microphone Soundskrit en fonction de la distance par rapport à la source sonore

Modification de la longueur du trajet acoustique

Un microphone directionnel réagit au mouvement de l'air entraîné par la différence de pression entre ses orifices d'entrée et de sortie. Lorsqu'une onde acoustique se déplace à travers ses orifices, l'amplitude et la phase de la pression à chaque orifice déterminent la différence de pression. L'effet de proximité est le résultat de la différence de pression causée par la décroissance d'amplitude de l'onde acoustique lorsqu'elle se déplace de manière sphérique (voir section précédente). En plus de la différence d'amplitude, la différence de phase est également un contributeur important à la différence de pression. Dans le champ lointain (c'est-à-dire que le microphone est soumis à une onde plane), la différence d'amplitude est négligeable (pas d'effet de proximité) et la différence de phase de l'onde acoustique est le principal contributeur à la différence de pression.

La différence de phase est déterminée par le **longueur du trajet acoustique**, comme le montre la figure 7. La longueur du trajet acoustique est la distance qu'une onde acoustique doit parcourir d'un port sonore à l'autre. Lorsque le microphone est monté sur un circuit imprimé, le circuit imprimé modifie la longueur du chemin acoustique entre le port sonore supérieur et inférieur du microphone, car une onde sonore doit s'enrouler autour du circuit imprimé pour passer d'un port sonore à l'autre. La longueur du trajet acoustique dépend de la largeur et de l'épaisseur de l'objet (c'est-à-dire un circuit imprimé) sur lequel le microphone est monté. Lorsqu'il est intégré à l'intérieur d'un produit, le même principe s'applique.

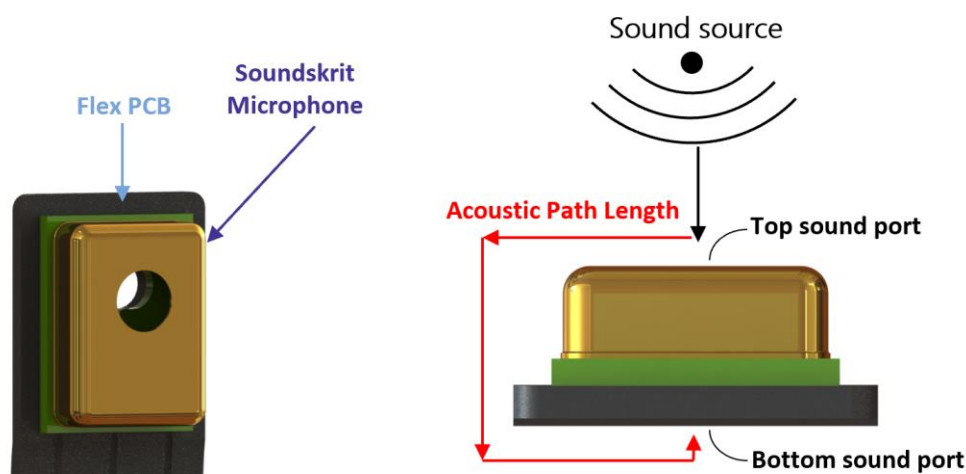


Figure 7: Vue en perspective (à gauche) et vue de dessus (à droite) d'un microphone Soundskrit monté sur un circuit imprimé flexible à des fins de test

Au fur et à mesure que la longueur du trajet acoustique augmente, la différence de phase et donc la différence de pression perçue par les deux ports sonores augmentent également. Cela provoque un gain de sensibilité à toutes les fréquences. Inversement, à mesure que la longueur du trajet acoustique diminue, la sensibilité diminue en conséquence. Lorsque la longueur du trajet acoustique se rapproche de la longueur d'onde du son entrant, la réponse du microphone peut commencer à se dégrader. Pour un son de 20 kHz, la longueur d'onde correspondante est de 17 mm. Ainsi, pour maintenir une directivité idéale jusqu'à 20 kHz, il convient d'éviter les longueurs de trajet acoustique supérieures à 17 mm. Cependant, de nombreuses applications ne nécessitent pas une directivité idéale jusqu'à 20 kHz, ce qui permet d'utiliser des longueurs de trajet acoustique plus longues.

Lorsqu'une onde sonore se déplace autour du microphone et du circuit imprimé, elle peut suivre de nombreux chemins. Si les longueurs de ces trajets ne sont pas égales (c'est-à-dire que le PCB n'est

pas symétrique), la longueur du trajet acoustique n'est pas nécessairement définie comme le montre la figure 7. Par exemple, si la longueur du trajet acoustique sur le côté du microphone est différente de celle autour du haut du microphone, la longueur effective du trajet acoustique vu par le microphone se situera entre les deux longueurs.

La figure 8 ci-dessous montre le gain de sensibilité du microphone en fonction de la longueur du trajet acoustique (lorsque le microphone est soumis à une onde plane). Ces mesures ont été prises avec le microphone monté sur un mince disque circulaire de différentes tailles. Les microphones Soundskrit se caractérisent par une longueur de trajet acoustique de 10 mm. Le gain de la figure 8 est représenté par rapport à 10 mm et suit l'équation :

$$Gain = 20 * \log_{10} \frac{\text{acoustic path length}}{10\text{mm}}$$

Équation 3: Gain dû à la longueur du trajet acoustique

Le gain indiqué à la figure 8 ne s'applique qu'aux scénarios où la longueur du trajet acoustique est augmentée en utilisant un circuit imprimé plus large ou une structure de support comme le disque circulaire illustré. On suppose que le volume d'air devant ou derrière le microphone n'est pas augmenté. En d'autres termes, aucun long canal acoustique (ou tubes) n'est couplé aux ports sonores avant ou arrière du microphone. Cela peut provoquer des résonances indésirables au niveau du microphone et la relation de gain entre la longueur du trajet acoustique et la sensibilité peut différer de celle illustrée à la Figure 8.

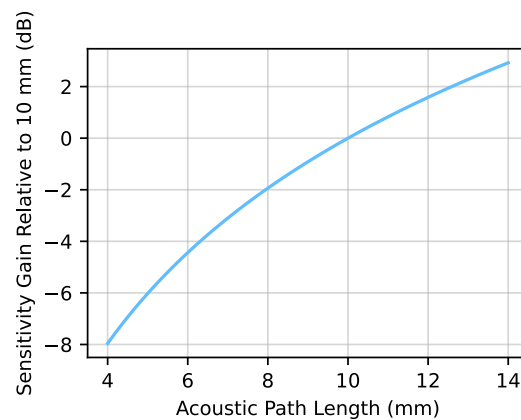
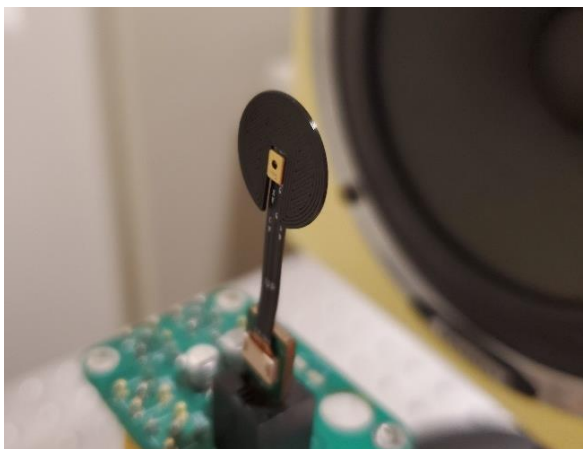


Figure 8: Sensibilité du microphone Soundskrit en fonction de la longueur du trajet acoustique

Un gain de sensibilité a deux effets importants sur les performances du microphone. Tout d'abord, comme le bruit propre d'un microphone est constant, un gain de sensibilité du microphone entraîne une augmentation équivalente du rapport signal/bruit. Deuxièmement, un gain de sensibilité du microphone correspond à une réduction du point de surcharge acoustique d'un nombre équivalent de décibels. Ainsi, les performances du microphone peuvent être modifiées en choisissant la longueur de chemin acoustique appropriée lors de la conception des microphones en un produit final. En pratique, la longueur du trajet acoustique vu par le microphone sera rarement inférieure à 10 mm si l'on tient compte des plastiques environnants de l'enceinte.

Calcul du rapport signal/bruit

Le **rapport signal/bruit** (SNR) d'un microphone omnidirectionnel est généralement calculé en divisant la sensibilité de 1 kHz du microphone par le bruit intégré sur l'ensemble du spectre audio. Cela fonctionne pour les microphones omnidirectionnels, car la plupart présentent une réponse en fréquence plate sur toute la gamme des fréquences audibles. Cependant, étant donné que la réponse en fréquence d'un microphone directionnel n'est pas plate, le calcul du rapport signal/bruit doit être modifié en conséquence pour fournir une mesure précise des performances. Au lieu d'utiliser uniquement la sensibilité de 1 kHz, le bruit électrique du microphone à chaque fréquence (unités de V²/Hz) doit être divisé par la sensibilité correspondante au carré à chaque fréquence (unités de V²/Pa²) pour obtenir le bruit acoustique d'entrée référé à chaque fréquence (unités de Pa²/Hz). Ensuite, le bruit acoustique pondéré A est intégré sur la bande passante audio souhaitée, $f_1 - f_2$, et converti en un niveau de pression acoustique équivalent (dBA SPL). Enfin, le rapport signal/bruit est calculé en soustrayant le bruit référent d'entrée équivalent de 94 dB SPL. Dans le cas de l'SKR0400, le bruit référent d'entrée équivalent est de 30,5 dBA, de sorte que le rapport signal/bruit final est de 63,5 dBA. L'équation de calcul est illustrée ci-dessous :

$$SNR = 94 - 20 \log_{10} \left(\frac{1}{P_{ref}^2 [Pa^2]} \int_{f_1 [Hz]}^{f_2 [Hz]} \frac{noise \left[\frac{V^2}{Hz} \right]}{sensitivity \left[\frac{V^2}{Pa^2} \right]} A_w df [Hz] \right)$$

Équation 4: Calcul du SNR

Pour calculer le rapport signal/bruit du microphone sur toute la gamme de fréquences audibles, $f_1 = 20$ Hz et $f_2 = 20$ kHz. Dans certaines applications, la bande passante complète de 20 kHz peut ne pas être nécessaire. Dans ce cas, il suffit d'intégrer le bruit acoustique référé à l'entrée sur la bande audio souhaitée.

Pour obtenir un diagramme de directivité dipolaire avec des microphones omnidirectionnels, un réseau différentiel soustraira la sortie de deux microphones avec un espacement donné. L'espacement entre les deux microphones omnidirectionnels est l'équivalent de la longueur du trajet acoustique d'un microphone directionnel. Pour comparer les performances d'un microphone directionnel à celles d'un réseau de microphones omnidirectionnels, les longueurs de trajet acoustique des deux systèmes doivent être réglées sur la même valeur. La figure 9 compare le rapport signal/bruit du SKR0400 à celui d'un réseau utilisant des microphones omnidirectionnels à SNR de 70 dBA.

La sensibilité du réseau de microphones omnidirectionnels est faible en raison de la faible différence de pression observée entre les deux microphones. Les transducteurs MEMS des microphones omnidirectionnels typiques ne sont pas conçus pour réagir à de si petites différences de pression, ce qui entraîne une chute significative du rapport signal/bruit, comme le montre la figure 9. Un réseau de deux microphones omnidirectionnels de 70 dBA a un rapport signal/bruit de 53 dBA lorsqu'il est espacé de 10 mm pour créer un diagramme de captation dipôle, perte de 17 dBA en rapport

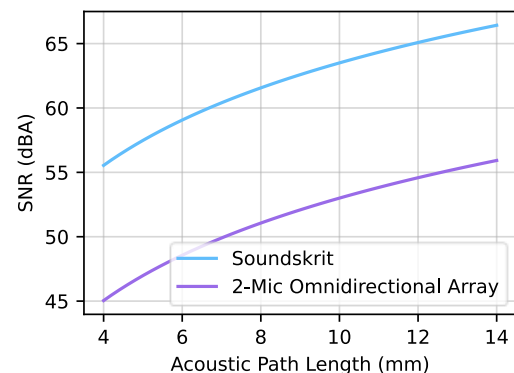


Figure 9: Sensibilité du microphone Soundskrit en fonction de la longueur du trajet acoustique

signal/bruit. Pour la même longueur de trajet acoustique (en supposant qu'il ne soit pas excessivement long), le SKR0400 maintient toujours un rapport signal/bruit supérieur de 10,5 dBA à celui du réseau de microphones omnidirectionnels.

Calcul de la distorsion harmonique totale

La **distorsion harmonique totale (THD)** d'un microphone est une mesure de la **distorsion harmonique** présente dans le signal capté par le microphone. Il est calculé en jouant une onde sinusoïdale acoustique à une fréquence spécifique et en divisant la somme des puissances des composantes harmoniques du signal capturé à la puissance de la fréquence fondamentale. La réponse d'un microphone avec une réponse en fréquence non plate doit d'abord être égalisée/aplatie (voir la section Création d'une réponse en fréquence plate) avant que la distorsion harmonique totale ne soit calculée. Cela permet de comparer correctement les composantes harmoniques du signal capturé à la fondamentale.

Création d'une réponse en fréquence plate

Les concepteurs souhaitent souvent que leur système présente une réponse en fréquence plate pour enregistrer un signal sans introduire de tonalité à partir du microphone. Parce que la réponse en fréquence d'un microphone directionnel n'est pas plate, on peut utiliser un simple **égalisation (EQ)** dans le logiciel pour aplatir la réponse. La sensibilité peut être ajustée pour correspondre à toutes les fréquences à l'aide de filtres courants. Un exemple de signal de microphone non égalisé et égalisé est

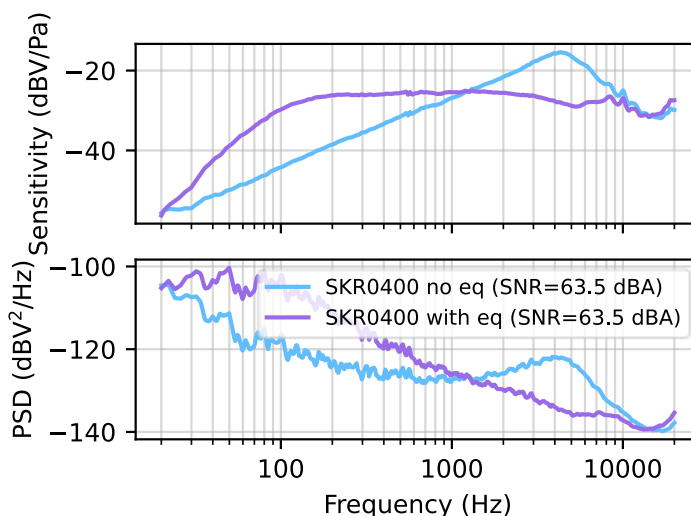


Figure 10: Sensibilité du microphone non égalisée et égalisée

illustré à la figure 10 ci-dessous.

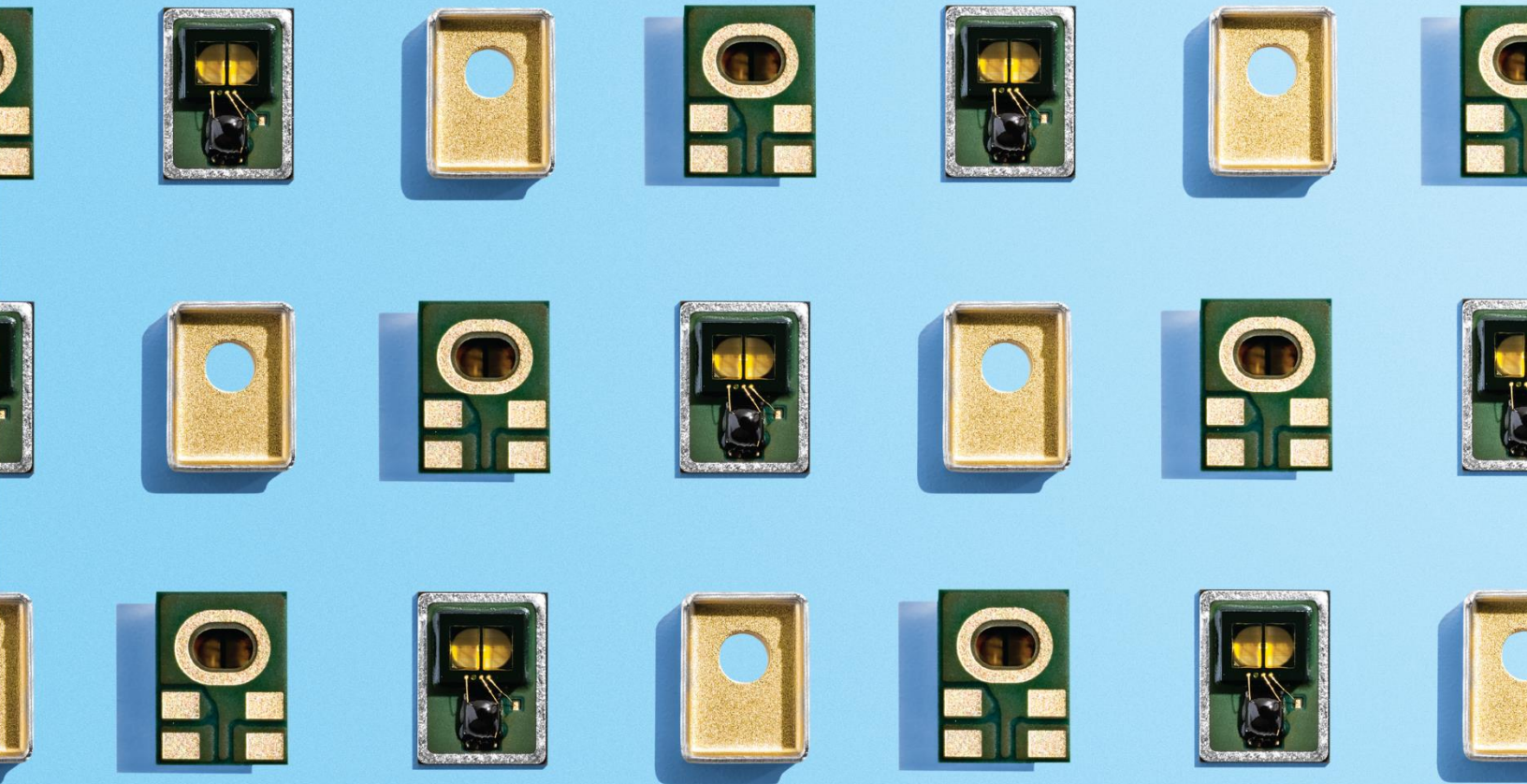
Comme indiqué, la réponse de sensibilité du microphone peut facilement être égalisée en une réponse plate ou toute autre forme souhaitée. Dans certaines applications, il peut être souhaitable de mettre en œuvre une atténuation des basses fréquences inférieure à 100 Hz dans la réponse du microphone, car l'énergie de la parole en dessous de 100 Hz est limitée. Étant donné que l'égalisation amplifie ou atténue proportionnellement la sensibilité du microphone et le bruit, elle n'a pas d'impact sur le rapport signal/bruit du microphone. Le bruit acoustique référencé à l'entrée du microphone ne change jamais. Pour les applications où le microphone est placé près de l'utilisateur, comme dans la perche d'un casque, l'effet de proximité permet une égalisation et un aplatissement naturels de la réponse aux basses fréquences. Ainsi, le logiciel n'a peut-être besoin que d'aplatir les hautes fréquences du signal.





Soundskrit a développé le premier microphone MEMS directionnel haute performance sur le marché, en s'appuyant sur des années de recherche sur les MEMS bio-inspirés basés sur la façon dont les araignées et autres insectes de la nature entendent. En combinaison avec les algorithmes de traitement audio internes de Soundskrit, les microphones directionnels peuvent être utilisés pour capturer et isoler n'importe quel son dans un environnement avec une fraction de la taille, de la puissance et du calcul des réseaux de microphones omnidirectionnels traditionnels.

Soundskrit a été fondée en 2019 et son siège social est situé à Montréal, au Québec, avec un centre de recherche et développement à Ann Arbor, au Michigan.



soundskrit
Hear the impossible.