

# conception et construction de microphones MEMS



Peter Riccardi (États-Unis)

**Vous pouvez dépenser des milliers d'euros pour un microphone à champ libre. Mais avant de le faire, découvrez ce circuit basé sur les MEMS, qui vous offrira de superbes performances à un coût bien moindre.**

Les acousticiens et les ingénieurs en acoustique ont souvent recours à des microphones de mesure pour acquérir des signaux physiques au cours de leurs expériences. Les microphones à condensateur typiques de sociétés telles que PCB Piezotronics coûtent plus de 1000 USD. La qualité de ces microphones est superbe, mais il existe des alternatives disponibles pour les amateurs et les passionnés qui vous permettront d'obtenir les performances dont vous avez besoin pour une fraction du coût. Ici, on étudie une conception basée sur les MEMS avec l'objectif d'avoir un plancher de bruit aussi bas que possible et une réponse stable en fréquence dans la bande audio de 20 Hz à 20 kHz.

Le prototype doit être peu coûteux, simple à concevoir et à assembler, et s'intégrer de manière simple dans le flux de travail typique d'un acousticien expérimentateur. Les projets typiques en acoustique sont alimentées par des entrées IEPE DAQ, de sorte que le microphone fonctionnera avec une excitation IEPE [1], ce qui permet d'alimenter le préamplificateur et les éléments MEMS. La technologie des microphones MEMS s'est améliorée au cours des dernières années, de sorte que leur bruit de fond est assez faible. Le moyennage analogique par l'utilisation d'un réseau en parallèle permet de réduire davantage le bruit ; nous utiliserons cette méthode ici.

## Schéma électrique

Il existe de nombreux types de microphones MEMS qui pourraient répondre aux exigences de ce projet. Ici, nous avons choisi le TDK ICS-40300 pour sa réponse étendue en basse fréquence (grâce à un volume arrière étendu) : 6-20 000 Hz, sa sensibilité raisonnable : -45 dBV à 94 dB SPL, et son faible bruit de fond : -108 dBV. Sur le plan mécanique, il sera logé dans un boîtier d'un diamètre nominal de 0,5 pouce. Cela lui donnera un petit facteur de forme et permettra une utilisation facile dans un laboratoire acoustique avec les calibrateurs existants, les supports de micro, etc. Un connecteur BNC situé à l'arrière du boîtier alimentera l'IEPE et émettra la forme d'onde modulée en

tension. Un réseau sera conçu pour réduire le bruit de fond. L'objectif est de disposer de quatre éléments dans le réseau, pour une amélioration maximale du bruit de 6 dB. Pour obtenir la gamme dynamique la plus large possible, le préamplificateur fournira un gain pour amener la sortie maximale prévue du microphone au rail d'alimentation. Ici, ce sera 3,3 V. Selon la fiche technique, la tension maximale de sortie est de  $0,355 V_{rms}$  @ 130 dB SPL. Quelques calculs rapides permettent d'obtenir des valeurs plus intuitives.

Tout d'abord, la sensibilité doit être exprimée en mV/Pa. Le niveau de pression acoustique (SPL) est :

$$dB\ SPL = 20 \log_{10} (P_{rms} / P_{ref})$$

SPL est une valeur en décibels.  $P_{rms}$  est la moyenne quadratique de la pression mesurée.  $P_{ref}$  est la pression de référence (20  $\mu$ Pa dans l'air). Avec un simple calcul, on obtient 1,417 Pa<sub>pk</sub> à la sensibilité nominale de -45 dBV. Maintenant, la tension (en mV) doit être dérivée de façon similaire à partir de la valeur donnée de -45 dBV. Ici, la tension de "référence" est supposée être de 1 V. L'équation de base serait la suivante :

$$dBV = 20 \log_{10} (V / 1\ V)$$

produisant une tension de crête de 5,623 mV<sub>pk</sub>. Remarque : par définition, le niveau de pression acoustique correspond à une forme d'onde de pression moyenne quadratique. La tension étant une simple valeur en décibels, le numérateur et le dénominateur de la fonction logarithmique sont supposés être des valeurs de crête. En divisant la tension de crête par la pression de crête, on obtient la sensibilité suivante :

$$\text{sensitivity} = 1.417\ Pa_{pk} / 5.623\ mV_{pk} = 3.968\ mV / Pa$$

La sensibilité sera multipliée par tout gain dans le préamplificateur, de sorte que la sensibilité peut être réécrite comme suit :

$$\text{sensitivity} = 3.968\ mV / Pa * A$$

où :

A = gain

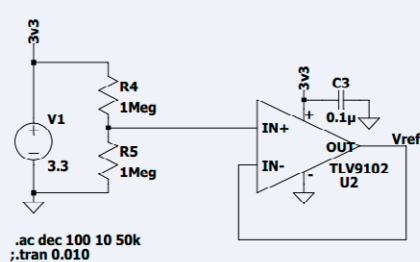


Figure 1. Schéma LTspice simplifié du circuit proposé.

On est loin de la qualité de mesure la plus typique de 50 mV/Pa, mais c'est un compromis nécessaire pour utiliser les éléments MEMS à basse tension avec un large intervalle dynamique d'amplitudes de pression – jusqu'à 130 dB SPL. Un microphone à condensateur ordinaire peut osciller jusqu'à 20 V<sub>pk-pk</sub> pour les modèles à faible tension. Il est possible d'augmenter cette sensibilité en ajoutant du gain au préamplificateur. Pour maximiser la gamme dynamique de notre système, nous devons tenir compte de la marge de manœuvre. Nous avons choisi des amplificateurs à basse tension, fonctionnant sur une rampe de 3,3 V. Cela garantit une faible consommation d'énergie, tout en maximisant le niveau de variation de tension que le système peut produire. La fiche technique précise la tension maximale de sortie du microphone à la pression nominale la plus élevée qu'il peut atteindre ; cette valeur peut être utilisée pour calculer le gain. Selon la fiche technique, la tension de sortie maximale est de :

$$V_{out} = 0.355 V_{rms}$$

La tension de sortie crête à crête est d'environ :

$$V_{out} = 0.355 * 1.414 = 1 V_{pk-pk}$$

L'oscillation totale d'un amplificateur opérationnel rail à rail fonctionnant sur un rail unipolaire de 3,3 V est d'environ 3,3 V. Le gain, pour atteindre l'oscillation maximale, serait donc :

$$A = \frac{\text{output}}{\text{input}} = \frac{3.3 V_{pk-pk}}{1.00 V_{pk-pk}} = 3.3$$

Cela implique également l'utilisation d'une masse virtuelle à 3,3 V/2 = 1,65 V et qui constituera donc la tension de référence, V<sub>ref</sub>, utilisée dans ce circuit. Les éléments du microphone peuvent avoir un décalage de tension continue considérable, de sorte que les sorties de chaque microphone doivent être couplées en courant alternatif par un simple filtre RC. Ici, un condensateur de 1 µF et une résistance de 47 kΩ sont utilisés, produisant une fréquence de coupure de :

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{6.28 * 47,000 * 0.000001} = 3.4 \text{ Hz}$$

On a choisi une fréquence de coupure relativement élevée pour pouvoir utiliser un petit condensateur 0603 avec une tension nominale appropriée.

### Circuit

Le circuit de la figure 1 est un schéma simplifié illustrant la topologie proposée. Le nœud de sortie constitué de résistances de 10 Ω forme un circuit de moyennage analogique. Théoriquement, le bruit généré par l'ensemble des ampli-op et le bruit généré (électriquement) dans les

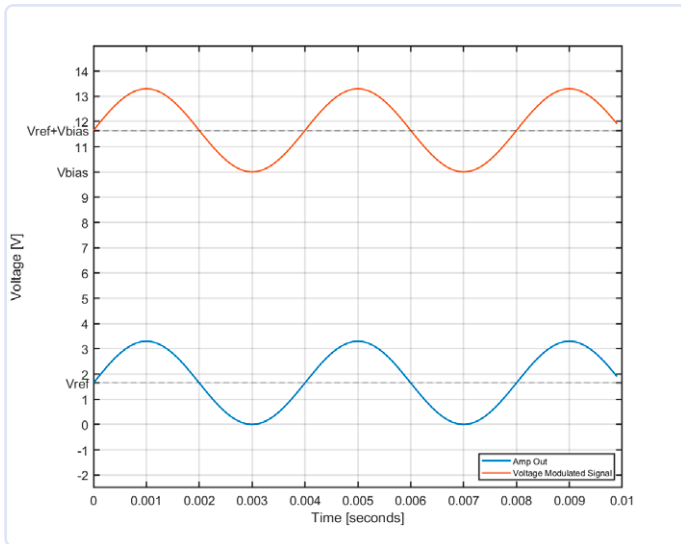


Figure 2. Formes d'ondes typiques et polarisation dans un système alimenté par IEPE. Ici, le signal injecté est une onde sinusoïdale de 250 Hz est. Le tracé bleu correspond à la sortie obtenue au niveau du nœud de calcul de la moyenne. La sortie est polarisée sur la tension de référence,  $V_{ref}$  et on peut voir le signal osciller autour de cette tension continue. En décalant cette tension par une autre tension,  $V_{bias}$ , on peut programmer la sortie pour qu'elle fonctionne à une tension continue égale à environ la moitié de la tension de conformité prévue d'un DAQ IEPE. On a utilisé le 4431 de NI comme référence, qui produit 2,1 mA à une tension devant dépasser 20 VDC. Par conséquent, on a choisi une valeur autour de 10-15 VDC comme point de fonctionnement du système.

microphones MEMS ne sont pas corrélés. Il est donc possible d'obtenir une amélioration maximale du bruit de fond de 6 dB. Ce problème est compliqué parce que le bruit qui pourrait se produire à la sortie n'est pas uniquement dû à l'électronique. Les microphones MEMS sont sujets à un bruit acoustique dû aux interactions moléculaires de l'air en contact avec ses diaphragmes. Le phénomène du bruit dans le contexte des circuits électriques et des systèmes acoustiques est extrêmement complexe et dépasse largement le cadre de cet article. On suppose que, sur le plan électrique, les sources de bruit ne sont pas corrélées, et l'on espère que la majorité des bruits acoustiques ne le sont pas non plus. Au moins, le bruit acoustique qui n'est pas corrélé sera moyenné. Les lecteurs intéressés trouveront des informations complémentaires sur le bruit ici [2][3].

Remarque concernant la figure 1 : une tension de 3,3 VDC est générée du rail, avec un diviseur de tension à haute impédance tamponné pour produire une tension de référence égale à la moitié de la tension d'alimentation. Quatre éléments MEMS sont en parallèle, chacun avec son propre préamplificateur avec un gain nominal de  $A = 3,2$ . Le filtre RC élimine le décalage en courant continu des éléments MEMS tout en injectant simultanément la tension de référence dans la borne non inverseuse. Les sorties de chaque ampli-op sont reliées entre elles par des résistances à faible impédance. La séparation ohmique permet aux tensions d'être effectivement moyennées à leur nœud de sortie sans créer de court-circuit entre les bornes et saturer les transistors de sortie.

### Alimentation IEPE et distribution de puissance

Integrated Electronics Piezo-Electric (IEPE) est une norme intelligente de distribution de puissance utilisée dans de nombreux systèmes d'acquisition de données (DAQ). Elle résout ingénieusement le problème de l'alimentation et de la réception d'un signal sur une interface à deux fils. Pour ce faire, elle exploite les propriétés variables d'une source de courant constant. Rappelons qu'une source de courant constant a - dans le cas idéal - une impédance de sortie

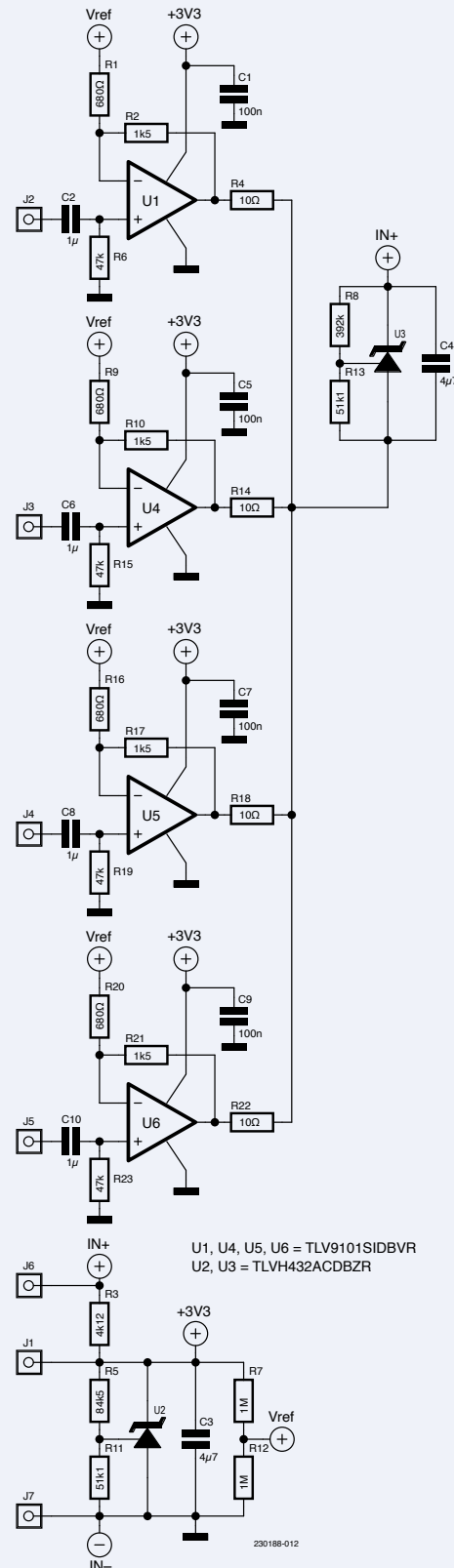


Figure 3. Le schéma du circuit conçu, construit et testé. On a initialement omis le tampon sur la tension de référence (voir figure 1) dans le premier prototype. Il s'agit d'une erreur de conception qui pose des problèmes. Il ne faut donc pas l'omettre si l'on reproduit le travail. Les références "J" sont des pastilles à trous traversants pour souder des "fils volants". Le connecteur BNC dans le boîtier mécanique est câblé point à point au préamplificateur. Le câble positif du connecteur alimente U2, le régulateur de 3,3 V, et est traversé par une tension égale à VIEPE - la tension de conformité définie. La sortie du nœud de sommation alimente un autre régulateur Zener réglé à environ 10 VDC, produisant ainsi la tension de conformité totale comme illustré à la figure 2.

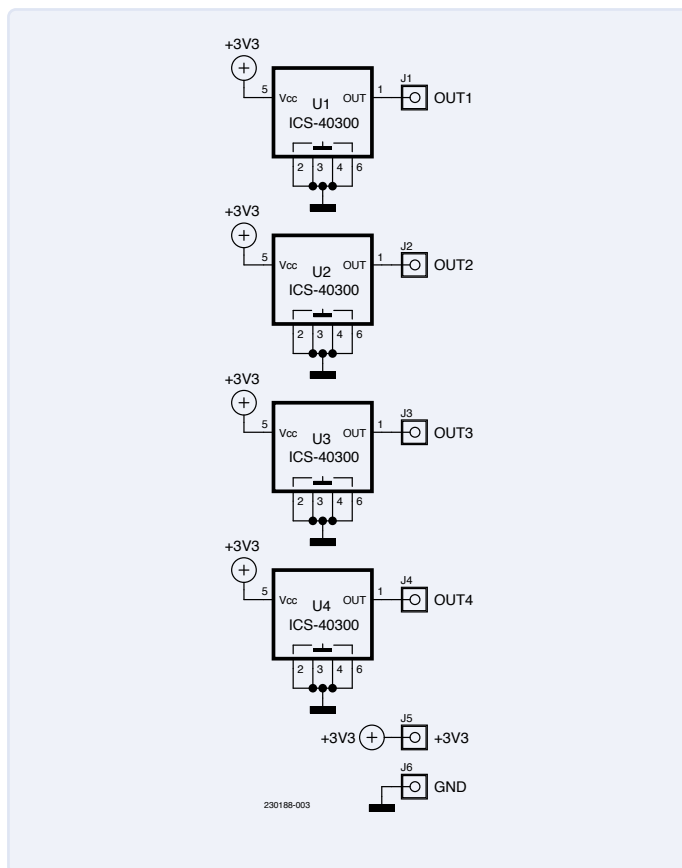


Figure 4. Schéma de la carte MEMS "porteuse" - un petit circuit imprimé circulaire qui abrite les quatre microphones et comporte un certain nombre de pastilles traversantes pour le câblage des câbles de signaux de sortie (entrées du préamplificateur) et pour l'alimentation et la mise à la masse. Comme on peut le voir, il y a au total six références "J", quatre signaux de sortie, plus 3,3 V et GND.

infinie. En pratique, cela se traduit par une pente très élevée de la courbe V-I. Cela signifie que la source de courant introduit un courant dans la charge (le préamplificateur et le microphone) quelle que soit la tension qu'elle reçoit. Ainsi, le préamplificateur peut moduler la tension - appelée tension de conformité - et un courant constant circulera toujours dans le préamplificateur pour ses rails d'alimentation et sa distribution. La **figure 2** montre un exemple de forme d'onde observée dans un système basé sur l'IEPE.

Le 4431 de NI a été utilisé comme DAQ de "référence" approprié parce que les composants de National Instruments sont largement utilisés dans la recherche acoustique et que leurs sources d'IEPE sont toutes similaires. Le 4431 délivre 2,1 mA et a une tension de conformité qui dépasse 20 VDC. Si le point de fonctionnement en courant continu du système se situe dans ces limites, le circuit fonctionnera. Il convient de prévoir une marge de manœuvre suffisante pour que la tension alternative maximale polarisée par la tension de conformité continue ne dépasse pas les conditions de fonctionnement maximales.

Nous pouvons maintenant utiliser le courant constant de 2,1 mA pour concevoir notre schéma de distribution de puissance. Nous avons utilisé des régulateurs shunt Zener pour leur faible courant de cathode requis et leur facilité d'utilisation. Les ampli-op et les microphones MEMS consomment le plus d'énergie. D'après leurs fiches techniques, ils ont



Figure 5. Un microphone construit, emballé dans un boîtier imprimé en 3D avec le couvercle enlevé. L'emballage final est surdimensionné pour une conception nominale de 0,5 pouce, mais il est assez approprié pour une démonstration rapide du concept.

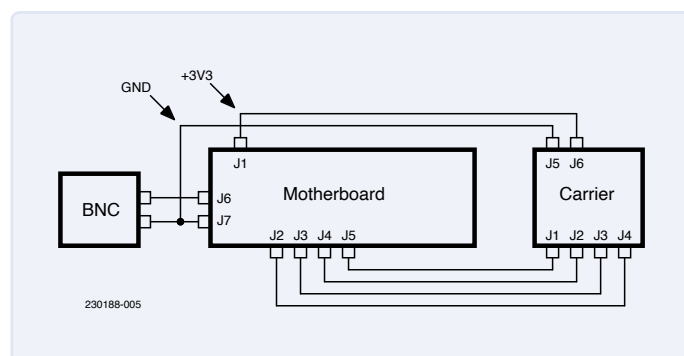


Figure 6. Le guide du câblage des circuits est présenté ici. Les tracés bleus correspondent aux signaux, les tracés noirs à la masse et les tracés rouges au rail d'alimentation. La "carte mère" est le préamplificateur, et le "support" contient les quatre microphones.

respectivement les caractéristiques suivantes :

$$I_q = 150 \mu A \text{ et } I_q = 250 \mu A$$

En supposant qu'on a cinq ampli-op et quatre MEMS, le tirage de courant pour leur alimentation est égal à 1,75 mA. Les 350  $\mu A$  restants alimenteront les régulateurs shunt. Le régulateur Zener alimentant le rail 3,3 V aura une résistance réglant son courant de cathode. On a choisi le TLVH432 comme référence Zener car il est ajustable. Il peut fonctionner avec 100  $\mu A$  de courant de cathode. Le régulateur de tension de polarisation n'aura pas de résistance en série pour régler son courant de cathode. Il "absorbera" simplement la différence entre le courant consommé par le circuit et les 2,1 mA du courant fourni.

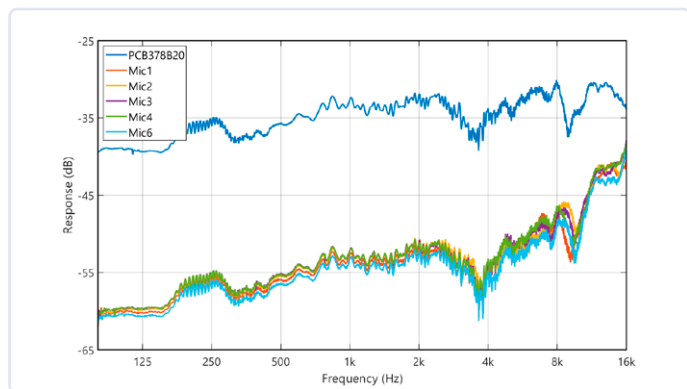


Figure 7. Réponse en fréquence des microphones (cinq d'entre eux) comparée à celle d'un microphone à champ libre PCB378B20. Ces mesures ont été effectuées dans une chambre semi-anéchoïque au-dessus de 200 Hz. Les tendances entre le microphone MEMS et le microphone commercial sont similaires. La plupart de ces "ondulations" ne sont pas de nature électrique, mais plutôt dues aux interactions acoustiques complexes des réflexions et des rebonds indésirables sur le support de la perche et d'autres surfaces dures dans la chambre. La différence notable est la tendance à la hausse des éléments MEMS au-dessus de 10 kHz, qui suit la FRF indiquée dans la fiche technique.

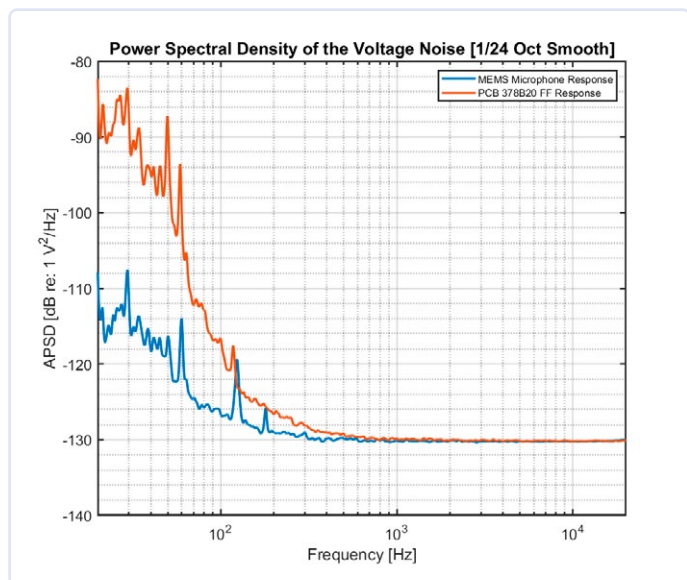


Figure 8. Bruit de tension mesuré dans une chambre semi-anéchoïque sans aucun son diffusé dans la chambre et sans correction de sensibilité (formes d'ondes de tension brutes). Au-dessus de 1 kHz, le microphone MEMS et le microphone commercial s'approchent tous deux du seuil de bruit du DAQ.

Vous trouverez un exemple complet de tous les calculs dans la note d'application complète proposée par Analog Devices [4]. En raison des pénuries d'approvisionnement et des problèmes possibles d'approvisionnement en références Zener à forte demande, une substitution appropriée serait de tirer parti d'une référence de tension flottante utilisant deux résistances et un NPN BJT 2N2222A (indice : consultez "741 op-amp discrete circuitry").

### Prototypage de préamplificateur et de microphone

Les figures 3 à 6 illustrent le circuit final. Nous avons conçu deux circuits imprimés, un petit circuit circulaire pour loger les quatre éléments du microphone, et un petit circuit rectangulaire pour loger l'électronique du préamplificateur. Le circuit a été câblé point à point et assemblé dans un boîtier imprimé en 3D avec des dimensions proches de celles d'un microphone de mesure nominalement 0,5 pouce. Pour les résultats des mesures, voir les figures 7 et 8.

### Conclusions et corrections

La première chose à noter est l'erreur évidente dans le schéma de la figure 3. Le circuit présenté a été conçu rapidement afin de répondre aux exigences de financement du projet initial. Il n'y a pas eu de temps pour la simulation. Ainsi, l'erreur évidente du rail surchargé n'a pas été détectée. Bien que le courant de sortie de ce rail soit très faible, de sorte que le circuit passe la "vérification" normale pour voir si le diviseur de tension est "rigide". Les amplificateurs opérationnels pilotent activement leurs sorties via la rétroaction à faible impédance pour égaliser les tensions des bornes inverseuses et non inverseuses. Il n'y a que 680  $\Omega$  de résistance entre la borne non inverseuse et la sortie du réseau diviseur. Le réseau diviseur a une séparation de 1 M $\Omega$  entre le point de mesure et le rail régulé. Donc, effectivement, l'ampli-op via sa rétroaction à faible impédance conduit activement la valeur sur ce nœud à être égale à sa propre sortie. L'effet est que le nœud de référence suit la sortie et se réduit essentiellement à un suiveur à gain unitaire, mais avec des interférences supplémentaires possibles. On a effectué toutes ces mesures sur le circuit original, comme le montre la figure 3. Il est donc possible d'améliorer les mesures de bruit. Un lecteur attentif aux calculs pourrait remarquer la faible sensibilité de la fonction de réponse en fréquence mesurée - c'est parce que l'amplificateur fonctionnait en mode gain unitaire, donc il était en baisse d'environ 10 dB. Lorsque cette carte sera remise en service, le tampon sera absolument nécessaire pour un fonctionnement correct.

### Assemblage

Les travaux futurs impliquent de reconcevoir l'enceinte pour qu'elle soit plus robuste. L'assemblage a été assez difficile car il y avait plusieurs petites caractéristiques approchant les limites d'épaisseur de paroi de l'imprimante avec une buse de 0,4 mm. La meilleure solution consistera probablement à utiliser un microphone d'un diamètre nominal de 1 pouce. Les circuits imprimés ont toujours été conçus pour être fabriqués avec une technique flexible rigide pour faciliter l'assemblage. Cela n'a pas été possible pour le premier prototype à cause des contraintes de temps. La combinaison de la carte porteuse et du préamplificateur sur un seul modèle, sans la solution de câblage point à point, simplifiera grandement la complexité et réduira le temps d'assemblage. Le coût total de construction d'une de ces unités était d'environ 30 USD ; la figure de bruit mesurée et la réponse en fréquence sont assez bonnes par rapport au coût.

Tous les fichiers sont disponibles sur la page du projet sur le site Hackaday [5].

230188-04

### Note de l'auteur

Je tiens à remercier l'équipe SPRAL de l'université d'État de Pennsylvanie pour son aide dans l'acquisition des mesures en chambre anéchoïque, et tout particulièrement M. Zane Rusk pour son soutien infatigable. De même, j'aimerais remercier l'Acoustical Society of America Chapter de l'université d'État de Pennsylvanie pour son soutien apporté tout au long du projet et lors de la présentation des travaux. PCBway a sponsorisé la construction de cinq microphones MEMS et a fourni tous les composants gratuitement. Je tiens à les remercier pour leur soutien au projet, qui a permis à des étudiants de troisième cycle de concevoir, construire et tester ces microphones de mesure gratuitement.



### À propos de l'auteur

Peter Riccardi travaille actuellement dans le domaine de l'aérospatiale en tant qu'ingénieur en avionique (électronique). Il a suivi une formation en génie mécanique et a obtenu un diplôme en 2018 à l'université de Rowan. En 2022, Peter a obtenu une M.S. en acoustique à l'Université d'État de Pennsylvanie. Il s'intéresse principalement à l'électronique audio et à l'électroacoustique ; sa recherche consistait à proposer un modèle de transduction linéaire du circuit équivalent du transformateur de mouvement de l'air, un appareil électroacoustique innovant. Ses projets personnels comprennent des réseaux de croisement actifs montés sur mesure en rack avec des amplificateurs de puissance intégrés, des préamplificateurs de platines à faible bruit, des platines sur mesure (cardan mécanique, moteurs, emballage, etc.).

### Questions ou commentaires ?

Envoyez un courriel à l'auteur ([pjriccardi@pjroses.co](mailto:pjriccardi@pjroses.co)) ou contactez Elektor ([redaction@elektor.fr](mailto:redaction@elektor.fr)).



### Produit

➤ **Elektor Audio Collection (clé USB)**  
<https://elektor.fr/19892>

### LIENS

- [1] IEPE [Wikipedia]: [https://en.wikipedia.org/wiki/Integrated\\_Electronics\\_Piezo-Electric](https://en.wikipedia.org/wiki/Integrated_Electronics_Piezo-Electric)
- [2] D. Self, "Chapter 1: Basics," Small Signal Audio Design, Focal Press, New York, NY, 2015, pp. 1-16.: <https://amzn.to/43dVyTa>
- [3] T. B. Gabrielson, "Mechanical-Thermal Noise in Micromachined Acoustic and Vibration Sensors," in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 40, no. 5, pp. 903-909, May 1993, doi: 10.1109/16.210197: <https://ieeexplore.ieee.org/document/210197>
- [4] Analog Devices, "IEPE-Compatible Interface for Wideband MEMS Accelerometer Sensors," CN-0532, 2020: <https://bit.ly/CN-0532>
- [5] P. Riccardi, "MEMS Based IEPE Powered Instrumentation Microphone," Hackaday.io: <https://hackaday.io/project/185762-mems-based-iepe-powered-instrumentation-microphone>

## MiniPlacer : une nouvelle machine pick-and-place pour CMS

MiniPlacer est une nouvelle machine pick-and-place entièrement automatique spécialement destinée au montage des prototypes et des petites séries. Elle privilégie la simplicité d'utilisation et la rapidité du paramétrage plutôt que la vitesse d'exécution.

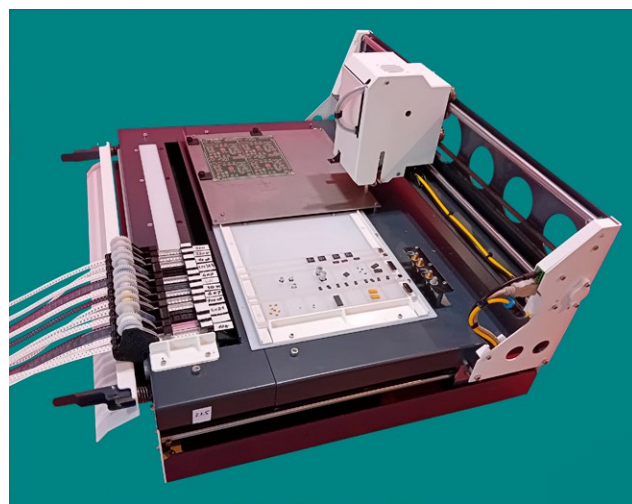
Une caméra facilite les réglages. L'analyse des images localise la position et l'orientation des composants. Des positionnements très précis sont obtenus par l'utilisation de règles découpées au laser.

Sa polyvalence exceptionnelle lui permet de s'adapter à une grande variété de composants, des plus petits aux plus grands. Les composants fournis en bande sont placés dans des chargeurs amovibles individuels. Les autres composants peuvent être posés dans des compartiments rectangulaires ou dans des casiers longs.

La machine change automatiquement sa buse de préhension pour s'adapter au mieux aux composants qu'elle doit placer.

Un logiciel simple et convivial commande la machine et un manuel d'utilisation détaillé guide la prise en main. Ce manuel peut être téléchargé sur le site [www.sidena.com](http://www.sidena.com) et une vidéo montre la machine en fonctionnement.

MiniPlacer s'adresse à tous ceux dont l'activité intègre la fabrication de cartes électroniques : PME, laboratoires de recherche et développement, enseignement.



Précision de positionnement = 0.05 mm  
Taille minimum des composants : 0603  
Surface du plateau : 220 x 280 mm  
Encombrement : 570 mm x 680 mm - H 380 mm  
Cadence : environ 300 composants / heure.

Conçu et fabriqué par SIDENA – 35 ch de la Cour de l'Orme – F78490 Grosrouvre  
Toutes les informations sur [www.sidena.com/miniplacer](http://www.sidena.com/miniplacer)