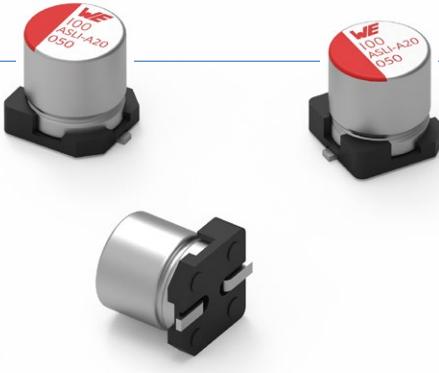


condensateurs électrolytiques en aluminium

sources potentielles de distorsions en technologie audio



René Kalbitz (Würth Elektronik eiSos)

Les condensateurs électrolytiques en aluminium sont soupçonnés d'être la cause ou au moins l'un des contributeurs à la distorsion à haute fréquence des signaux audio. Une étude menée par Würth Elektronik a examiné l'affaire en détail.

Dans le domaine de la technologie audio, il y a un débat permanent sur la part de l'audibilité de la distorsion du signal sur la qualité sonore des amplificateurs. Il semble que les condensateurs soient soupçonnés d'être la cause, au moins partielle, des distorsions à haute fréquence qui influent sur l'impression auditive. Würth Elektronik a consacré une étude à l'influence des condensateurs sur la distorsion [1]. Le débat sur l'audibilité de la distorsion ne porte pas seulement sur la mesure des propriétés électriques, mais

aussi sur leur interprétation en ce qui concerne leur perception par l'oreille humaine.

Cette étude compare la distorsion harmonique totale (THD) de condensateurs électrolytiques disponibles dans le commerce, tels que ceux fabriqués par Würth Elektronik eiSos, et de prototypes. Pour déterminer les paramètres qui influent sur la THD, les prototypes utilisés, avec différentes variétés de papiers isolants et de compositions d'électrolyte, ont été fabriqués en usine dans les mêmes conditions que la production de masse et analysés dans le laboratoire d'électronique de Würth Elektronik eiSos à Berlin. Pour permettre au lecteur d'interpréter les résultats, une introduction au domaine de l'audition humaine et de la psychoacoustique est présentée avant d'aborder l'étude de la distorsion harmonique dans les condensateurs.

L'audition humaine

L'oreille humaine peut percevoir des ondes sonores dans une gamme de fréquences comprise entre environ 20 Hz (limite inférieure) et 16 kHz (limite supérieure) [2]. Les sons situés dans cet intervalle sont appelés sons audibles. En-deçà de 20 Hz, on a les infrasons et au-delà de 16 kHz, les ultrasons.

On obtient une représentation graphique de la sensation auditive en traçant le niveau de pression acoustique en fonction de la fréquence audible (**figure 1**). Les courbes illustrées dans la figure sont appelées isophones et représentent des courbes d'intensité sonore égale, exprimée dans une unité appelée phon. Ces isophones relient la pression acoustique, mesurée en dB, à l'intensité sonore perçue. Un son d'un volume de 50 phon est perçu comme étant aussi intense qu'un son de 1 kHz ayant un niveau de pression acoustique de 50 dB. Le même niveau d'intensité sonore signifie que chaque son le long d'une courbe est perçu comme étant d'intensité égale, quelle que soit sa fréquence. L'intensité sonore est donc une variable de perception (psychoacoustique), contrairement à la pression acoustique, qui est une variable d'excitation (voir [1] pour les références). Dans la figure 1, la courbe la plus basse représente ce que l'on appelle le seuil d'audition. Ce seuil s'applique aux mesures effectuées avec des sons sinusoïdaux dans un champ sonore libre d'audition binaurale. Le niveau de pression acoustique est rapporté à la pression

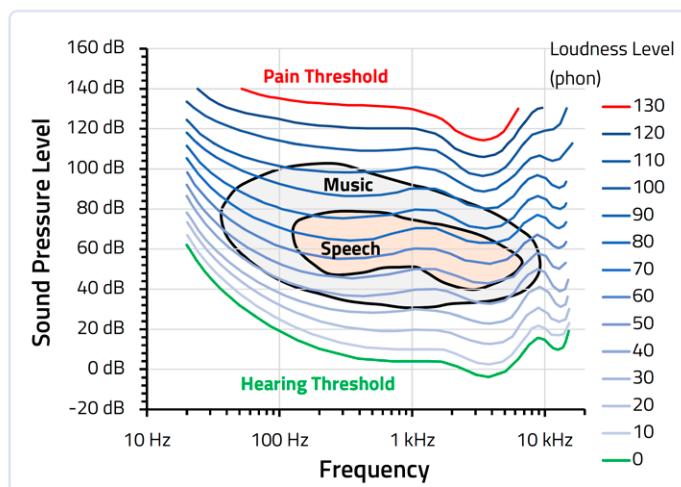


Figure 1. Zones de sensation auditive (DIN 45630).

acoustique de $20 \mu\text{P}$. Selon cette définition, le niveau de pression acoustique au seuil d'audition est de 4 dB à 1 kHz . Le champ de la parole est beaucoup plus étroit que le champ audible. Même la musique ne couvre qu'une partie du spectre auditif. Le seuil d'audition dépend fortement de la fréquence. La sensibilité auditive est maximale dans la plage comprise entre 2 et 5 kHz . Dans cette plage, la pression sonore la plus faible suffit à provoquer une sensation auditive. En dessous et au-dessus de cette plage, la sensibilité auditive décroît rapidement. La courbe supérieure représente le seuil de la douleur. Dans ce cas, la pression sonore est suffisamment élevée pour provoquer une douleur et entraîner des lésions auditives permanentes en cas d'exposition prolongée. La mesure subjective de l'intensité sonore peut être remplacée par la mesure objective de la pression acoustique pondérée illustrée à la **figure 2**. La pondération est effectuée en fonction de la fréquence en appliquant un filtre dont la courbe caractéristique est représentée sous sa forme normalisée et qui est approximativement l'inverse des isophones de la figure 1. Cette courbe est basée sur la recommandation de l'Union Internationale des Télécommunications (ITU-R BS.468-4). Par souci de clarté, la figure 2 indique également la fenêtre audible non pondérée.

La gamme dynamique de l'audition humaine est large, allant de 130 dB (seuil de la douleur) à -9 dB (seuil de l'audition). Cependant, cette large gamme ne peut pas être perçue simultanément aux deux extrémités de l'échelle. La capacité à percevoir une petite distorsion superposée à un signal principal ou de fond dépend fortement du domaine de fréquences et de la complexité du signal principal. Des études montrent que des distorsions de 2 à 5% peuvent être présentes dans des signaux vocaux et musicaux complexes sans être perçues par l'auditeur. Pour les harmoniques uniques, il a été constaté que, dans des conditions de laboratoire, l'oreille humaine peut distinguer la distorsion causée par ces harmoniques dans une fourchette de $0,3\%$ à $0,01\%$ ($\pm 4 \text{ kHz}$, la fréquence de sensibilité maximale) par rapport à la fréquence fondamentale (références dans [1]).

Les THD les plus faibles pour les 10 premiers harmoniques du test d'audition humain susmentionné sont de l'ordre d'environ 10% à 7% , en fonction de la fréquence fondamentale. Dans certaines conditions, l'oreille est donc capable de détecter des THD allant jusqu'à 7% , qui correspond à une variation du niveau de pression acoustique de 20 dB [1].

La THD est une mesure appropriée pour les systèmes présentant de faibles perturbations non linéaires causant des premiers harmoniques de l'ordre de 1% et décroissant vers zéro pour les harmoniques plus élevés. Toutefois, pour les perturbations non linéaires plus importantes dont les harmoniques supérieurs ne disparaissent pas, la THD peut ne pas être une mesure fiable de l'audibilité des perturbations.

THD d'un modèle de condensateur

Le spectre de fréquence mesuré d'un condensateur dont la fréquence fondamentale est de $448,9 \text{ Hz}$ (**figure 3**) montre une forte diminution de l'amplitude des harmoniques supérieurs, ce qui est typique pour tous les condensateurs étudiés et toutes les fréquences d'excitation. Les amplitudes des deux premiers harmoniques diminuent jusqu'à des valeurs bien inférieures à $0,1\%$ par

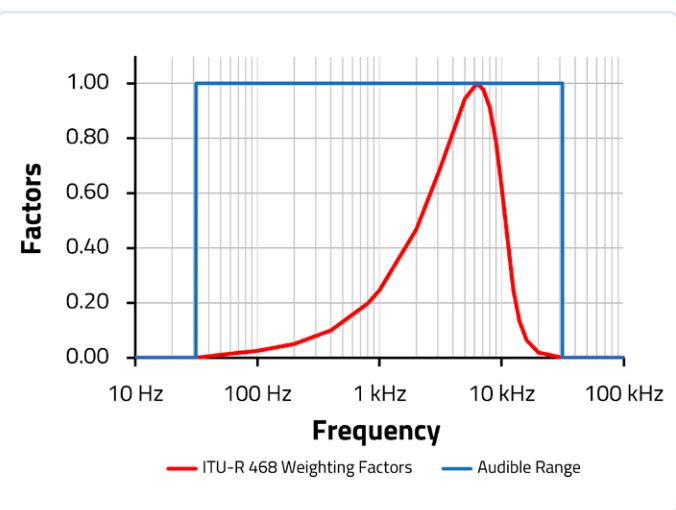


Figure 2. Représentation graphique de la délimitation de la gamme audible non pondérée et des coefficients de pondération suggérés par la norme ITU-R 468.

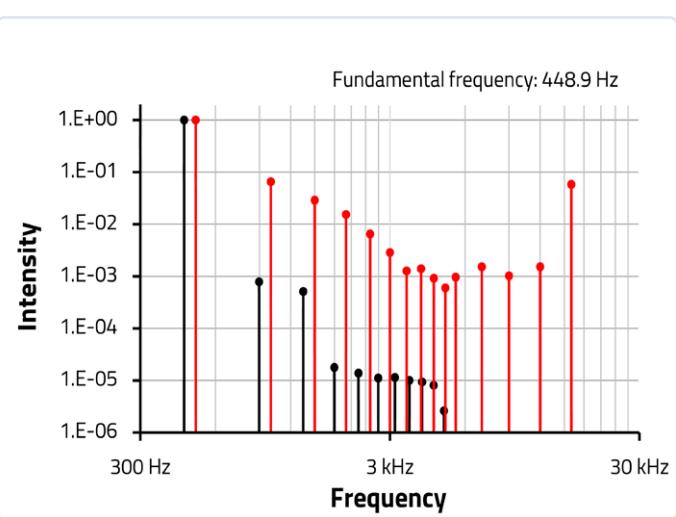


Figure 3. Spectre de fréquence mesuré d'un signal de tension sur un condensateur électrolytique en aluminium de $470 \mu\text{F}$ (WCAP-ASLI, 865080253012) à une fréquence fondamentale de $448,9 \text{ Hz}$, avec indication de la valeur des seuils de distorsion audible, déterminée lors d'une expérience psychoacoustique pour une fréquence fondamentale de 500 Hz .

rapport au signal fondamental. Les harmoniques d'ordre supérieur ne dépassent pas des valeurs de l'ordre de $0,001\%$, ce qui est bien inférieur au seuil d'audition (également illustré sur la figure 3), et donnent une THD de $0,078\%$. Les valeurs du seuil d'audition ont été déterminées lors d'une expérience psychoacoustique menée séparément à une fréquence fondamentale de 500 Hz et ont donné une THD de $7,3\%$.

Si l'on mesure les THD pour différentes fréquences fondamentales dans la gamme de fréquences allant de 1 Hz à 1 MHz , on obtient le graphique de la **figure 4**. Les THD dans cette mesure sont comprises entre $0,001\%$ et $0,4\%$, ce qui est bien inférieur aux valeurs de THD de l'expérience sur le seuil d'audition. Dans la gamme audible illustrée à la figure 4, les valeurs sont en grande partie bien inférieures à $0,1\%$.

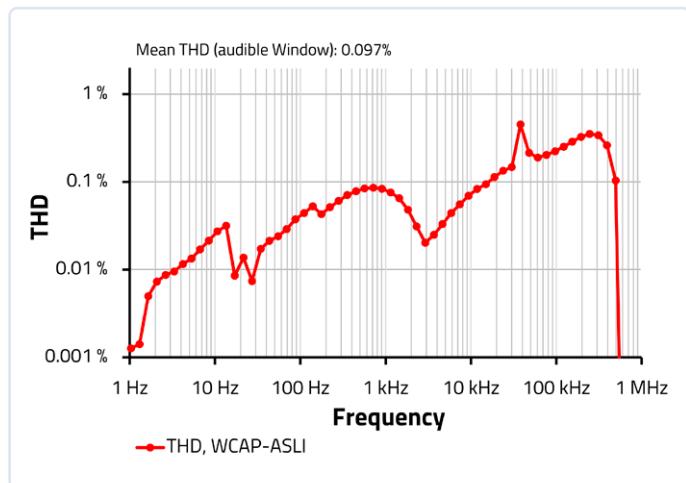


Figure 4. THD d'un condensateur électrolytique en aluminium de 470 µF (WCAP-ASLI, 865080253012), mesuré à différentes fréquences fondamentales dans une gamme de 1 Hz à 1 MHz.

Afin d'obtenir une mesure facile à utiliser de la distorsion de fréquence dans l'ensemble de la gamme audible, la THD_{Mean} moyenne et la THD_{ITU} moyenne pondérée peuvent être déterminées sur la base de la sensibilité auditive humaine de toutes les valeurs THD individuelles [1].

Ce type de calcul a été appliqué à une série de condensateurs disponibles dans le commerce (865080253012, 860240275007) et de prototypes fabriqués à la demande (P1-P6) d'une capacité de 470 µF (**figure 5**). Les prototypes représentent une grande variation dans la composition, la densité et l'épaisseur du papier isolant ainsi que dans la conductivité de l'électrolyte (détails sous [1]). Comme le montrent les barres d'erreur, les différences entre les mesures n'ont guère de signification statistique et ces variations du papier isolant et de l'électrolyte n'ont pas eu d'influence significative sur les THD.

L'effet des semi-conducteurs est plus important

L'étude suggère que les variations de matériaux ont une influence négligeable sur la distorsion et que la distorsion est inférieure au seuil d'audition. Les condensateurs électrolytiques n'ajoutent pas d'harmoniques supérieurs significatifs aux fréquences fondamentales lors de la transmission des signaux et peuvent donc, dans une large mesure, être considérés comme des composants linéaires. Il est probable que l'amplitude des distorsions produites par d'autres types de condensateurs insensibles à la tension et de dispositifs passifs reste faible par rapport au seuil auditif.

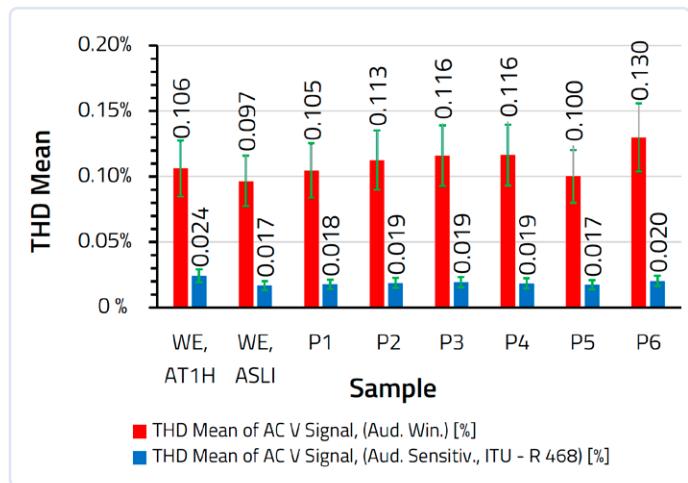


Figure 5. Valeurs mesurées pour THD_{Mean} (fenêtre audible) et THD_{ITU} (sensibilité acoustique). Les chiffres au-dessus des barres d'erreur indiquent les valeurs moyennes.

Par conséquent, le choix des composants non linéaires tels que les amplificateurs opérationnels et les diodes a un impact plus important sur la qualité audio de l'amplificateur lié à la distorsion, c'est-à-dire les caractéristiques de distorsion globales, que le choix du condensateur électrolytique. ↗

230702-04



À propos de l'auteur

René Kalbitz a étudié la physique à l'université de Potsdam et à l'université de Southampton (Royaume-Uni). Après avoir obtenu son diplôme, il a effectué ses recherches et son doctorat sur les semi-conducteurs et les isolants organiques à l'université de Potsdam. Il a acquis une expérience supplémentaire dans le domaine de la recherche appliquée à l'Institut Fraunhofer pour la recherche appliquée sur les polymères. Il a rejoint Würth Elektronik en 2018 en tant que chef de produit pour les supercondensateurs et supervise les projets de recherche et développement dans le domaine des condensateurs.

LIENS

[1] Kalbitz, R., « Effet acoustique des distorsions harmoniques causées par les condensateurs électrolytiques en aluminium », AppNote ANP125: <https://we-online.com/ANP125>

[2] Fellbaum, K., „Hörphysiologie und Psychoakustik. In: Sprachverarbeitung und Sprachübertragung“, pp 99-126, Springer, Berlin, Heidelberg (2012):