

LIVRE BLANC : ÉTIQUETTE ÉNERGIE

Caractérisation de la consommation électrique d'une enceinte passive

La sobriété énergétique est la diminution des consommations d'énergie par des changements de modes de vie et des transformations sociales. Elle implique donc, entre autres, d'améliorer le rendement des équipements en général, et électriques en particulier.

La reproduction du son passe par l'utilisation de l'électricité : le signal sonore n'est rien de plus qu'un signal électrique, qui est amplifié afin de mettre en mouvement les membranes des haut-parleurs qui génèrent l'onde acoustique que nous entendons.

Les haut-parleurs ont toujours été le maillon faible du rendement dans la chaîne du son. Les enceintes permettent d'augmenter largement ce rendement, au moyen de circuits acoustiques, qui « chargent » le haut-parleur, c'est à dire adaptent l'impédance acoustique du haut-parleur à celle de l'air ambiant. Ces circuits sont variés : pavillons, bass-reflex, résonateurs... Leur inconvénient est qu'ils sont très souvent encombrants, mais permettent, lorsqu'ils sont correctement choisis et conçus ce qu'on appelle du haut-rendement, c'est à dire que le ratio entre l'énergie acoustique générée et l'énergie électrique dissipée se rapproche de 1.

Avec l'augmentation de la puissance d'amplification disponible, notamment avec l'introduction des transistors puis de l'amplification de classe D, l'industrie électro-acoustique s'est progressivement détournée de la recherche du haut rendement, qui pourtant était importante dans les années 1950. La réduction du volume des enceintes a été jugée plus importante que le rendement, et l'usage des pavillons, entre autres, est tombé en désuétude. Plus le rendement des amplificateurs augmentait, plus celui des enceintes diminuait. De nos jours, les systèmes son de festivals peuvent consommer plusieurs centaines de kiloWatts.

Le haut rendement est nécessaire non seulement pour des raisons d'écologie, mais également pour des raisons d'autonomie et de praticité : une enceinte très consommatrice nécessite de grosses batteries et de nombreux panneaux solaires pour fonctionner. En revanche une enceinte à haut rendement permet une réduction de la taille de la batterie et des panneaux solaires (à autonomie et niveau sonore égaux), donc un gain de place et de poids significatif, une diminution des coûts et une économie de ressource liée à la fabrication des équipements.

OBJECTIF

Partant du constat que les métriques, normatives ou non, n'étaient pas suffisantes pour quantifier la consommation électrique d'une enceinte, PikiP Solar Speakers a développé de nouvelles métriques. Les résultats des travaux «Analyse critique détaillée des métriques existantes et nouveaux modèles de prédiction de la puissance dissipée par une enceinte», ont été publiés dans le Journal de l'Audio Engineering Society (AES) - la publication scientifique qui fait référence dans le monde de l'audio -, sous le nom «Quantifying Loudspeakers Power Consumption».

L'étiquette EFFICACITÉ ACOUSTIQUE est dérivée de l'un des modèles d'évaluation de la consommation électrique d'une enceinte proposés dans l'article.

Celle-ci est une signalétique simple qui permet de connaître la classe énergétique d'une enceinte. Elle classe les enceintes dans différentes catégories (de A+ à E), selon la puissance électrique qu'elles dissipent pour atteindre un niveau sonore cible. La classe et la consommation sont données pour l'enceinte sur l'étiquette énergie.

La quantité utilisée est le Watt pour un niveau sonore équivalent 102 dBA. Tous les détails nécessaires au calcul et les raisons des conditions choisies sont donnés dans la suite de ce document.



ÉTIQUETTE EFFICACITÉ
ACOUSTIQUE

ENCEINTES PASSIVES

A + < 150 W

A 150 à 300 W

B 301 à 500 W

C 501 à 1000 W

D 1001 à 1500 W

E >1500 W

À 102 dBA ÉQUIVALENT*

*La valeur donnée représente la puissance électrique consommée par l'enceinte pour reproduire sur sa bande de fréquence un niveau sonore équivalent de 102 dBA avec un bruit rose. Pour le calcul l'enceinte est considérée comme faisant partie d'un système égalisé ayant une réponse en fréquence absolument plate de 20Hz à 20kHz.

La méthode de calcul est linéaire et ne prend pas en compte les différents phénomènes de compression de puissance. Le calcul est détaillé dans l'article Quantifying Loudspeakers' Power Consumption, paru dans le Journal of the AES (July/August 2022, Vol 70 no 7/8).

ÉTAT DE L'ART

Actuellement, aucune métrique couramment utilisée par les fabricants et les techniciens du son ne permet de quantifier simplement la consommation électrique d'une enceinte, comme c'est le cas pour l'électroménager, ou les ampoules électriques, par exemple.

Certaines métriques, telle que la sensibilité d'une enceinte, semblent donner une information à ce sujet, mais sont en fait trompeuses, et très souvent mal utilisées. Le terme haut-rendement est par exemple souvent assimilé à une haute sensibilité, alors que ce sont deux choses tout à fait différentes et il n'est pas rare qu'une enceinte avec une haute sensibilité ait un rendement médiocre.

L'efficacité électro-acoustique est bien définie dans une norme (IEC 60268-22:2020), mais est trop

générale pour être appliquée, et n'est pas pensée pour la diffusion musicale.

Certains auteurs ont introduit des métriques très utiles et pertinentes, mais elles sont malheureusement peu connues et peu utilisées. Parmi celles-ci, on peut citer la réponse en fréquence à puissance constante (CIP), qui est similaire à la réponse en fréquence habituelle, mais est mesurée avec une puissance d'entrée constante, au lieu d'une tension constante.

En résumé, de nombreuses métriques existent, qui ont chacune leur utilité, leurs avantages et leurs inconvénients. Cependant aucune ne permet de quantifier directement la consommation électrique d'une enceinte acoustique.

L'étiquette a deux impératifs : elle doit être simple à comprendre et à reproduire (le calcul doit utiliser des données facilement mesurables et/ou accessibles par les différents constructeurs), tout en donnant une idée de la consommation en conditions réelles d'utilisation. Bien sûr, toutes les utilisations sont différentes, selon le type de musique, le lieu, l'ingénieur du son... les conditions sont donc idéalisées et se rapprochent d'une utilisation universelle.

1 - CONDITIONS DE MESURE

- Le signal d'entrée est un bruit rose (c'est à dire un signal contenant toutes les fréquences avec une décroissance de la densité spectrale de puissance en $1/f$, c'est à dire 3 dB par octave) de 20 Hz à 20 kHz.

C'est le meilleur compromis entre un signal très compliqué qui représenterait au mieux un signal musical et un signal simple à générer, et qui fait référence dans les normes existantes.

- La réponse de l'enceinte est équalisée de façon à avoir une réponse en fréquence absolument plate

Cela ne correspond pas exactement à des conditions d'utilisation classique, mais permet de limiter l'impact positif (mais fictif en conditions réelles) qu'auraient certaines caractéristiques d'enceintes mal conçues (résonance importante, irrégularités...), tout en étant facile à appliquer dans le cadre du calcul. La réponse d'une enceinte dans la réalité n'est jamais parfaitement plate après équalisation, mais comme il n'y pas de réponse universelle, il est plus simple de viser une courbe plate, neutre.

- Le niveau cible global est 102 dBA à 5 mètres

Les normes françaises utilisent 102 dBA pour un concert. 5 mètres est un compromis raisonnable de positionnement des premiers publics. Encore une fois, il s'agit avant tout de pouvoir opérer des comparaisons.

- L'enceinte est considérée partie d'un système son reproduisant de façon parfaitement plate un signal allant de 20 Hz à 20 kHz. Le calcul de sa consommation est effectué sur sa bande de fréquences d'utilisation spécifiée comme bande-passante dans la fiche technique.

Seul le signal faisant partie de la bande-passante alimente l'enceinte, cela signifie que l'enceinte n'a pas à générer seule le niveau cible, mais une proportion du niveau cible liée à la largeur et la valeur de la bande de fréquence, c'est ce qu'on appelle le niveau équivalent 102 dBA. Exemple : du fait de la distribution spectrale de puissance d'un bruit rose, l'octave 1000-2000 Hz contribuera dix fois moins au niveau global que l'octave 100-200 Hz, bien que la largeur de bande soit d'une octave dans les deux cas. En revanche, du fait de la pondération A, le niveau équivalent de l'octave 100-200 Hz est de 90 dBA, alors que le niveau équivalent de l'octave 1000-2000 Hz est de 95 dBA. La plage 20-20 kHz, elle, a bien sûr un niveau équivalent de 102 dBA, puisque c'est la référence.

- Les données servant au calcul (réponse en fréquence et impédance complexe) doivent être mesurées dans la zone linéaire de l'enceinte, c'est à dire en petits signaux.

La mesure en petits signaux (à niveau très faible) est la norme pour la caractérisation des haut-parleurs. Bien sûr chaque enceinte a un comportement différent à fort niveau, mais avoir une base de calcul est une condition nécessaire pour permettre la comparaison.

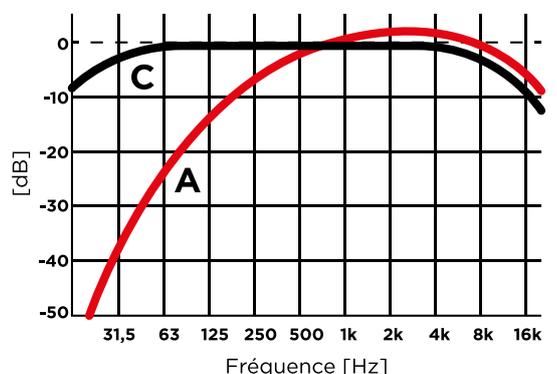
- 6 classes d'efficacité existent (A+, A, B, C, D, E), allant d'une consommation inférieur à 150 Watts pour la classe A+, jusqu'à supérieure à 1500 Watts pour la classe E.

Le rapport 10 entre la classe A+ et la classe E permet de prendre en compte les différents types d'enceintes habituellement rencontrés sur le marché de l'audio pro.

POURQUOI 102 dBA ?

Le niveau de 102 dBA choisi pour l'étiquette énergie correspond à la limite fixée par le décret n° 2017-1244 du 7 août 2017 relatif à la prévention des risques liés aux bruits et aux sons amplifiés.

La limitation est de 102 dBA sur 15 min ou de 118 dBC sur 15 min. La seconde limite en dB C existe afin de prendre en compte plus finement le niveau des basses fréquences, dont l'impact est fortement réduit par la pondération A.



Décret n° 2017-1244 du 7 août 2017 relatif à la prévention des risques liés aux bruits et aux sons amplifiés <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000035388481>

2 - CONSÉQUENCES DE CES CONDITIONS

Ces conditions de calcul entraînent les conséquences suivantes :

La première est que, si l'on dispose de plusieurs enceintes pour reproduire la bande de fréquences 20 Hz-20 kHz (par exemple un système trois voies, subwoofer 20-100 Hz, médium 100-2000 Hz, aigus 2000 Hz-20 kHz), il suffit de sommer la puissance consommée à leur niveau équivalent 102 dBA de chacun des éléments pour obtenir la consommation totale pour un niveau absolu de 102 dBA.

Deuxièmement, il est difficile de comparer des enceintes qui n'ont pas la même fréquence d'utilisation. Un moteur de compression jouant sur la plage 2-15 kHz consommera moins de puissance qu'une enceinte large-bande (50-1000 Hz) pour atteindre son niveau équivalent, parce que la proportion du signal (en terme énergétique) qui l'alimente est faible, et parce que la pondération A diminue dras-

tiquement la contribution des basses fréquences au niveau global. Un tweeter sera donc plus souvent dans les classes supérieures qu'un subwoofer.

Troisièmement, le fait d'utiliser la bande-passante spécifiée de l'enceinte pour le calcul permet de limiter la tentation d'étendre celle-ci artificiellement dans la fiche technique. En effet, descendre la coupure basse d'un subwoofer afin de le rendre plus attractif est tentant pour un fabricant, mais cela implique une augmentation de la consommation, puisque souvent les enceintes sont peu efficaces en basse fréquences.

Pour finir, le calcul est linéaire et se fait sur la base de petits signaux, il ne prend donc pas en compte les différents phénomènes de compression de puissance (compression thermique, non-linéarités de l'air, non-linéarités du moteur, etc.).

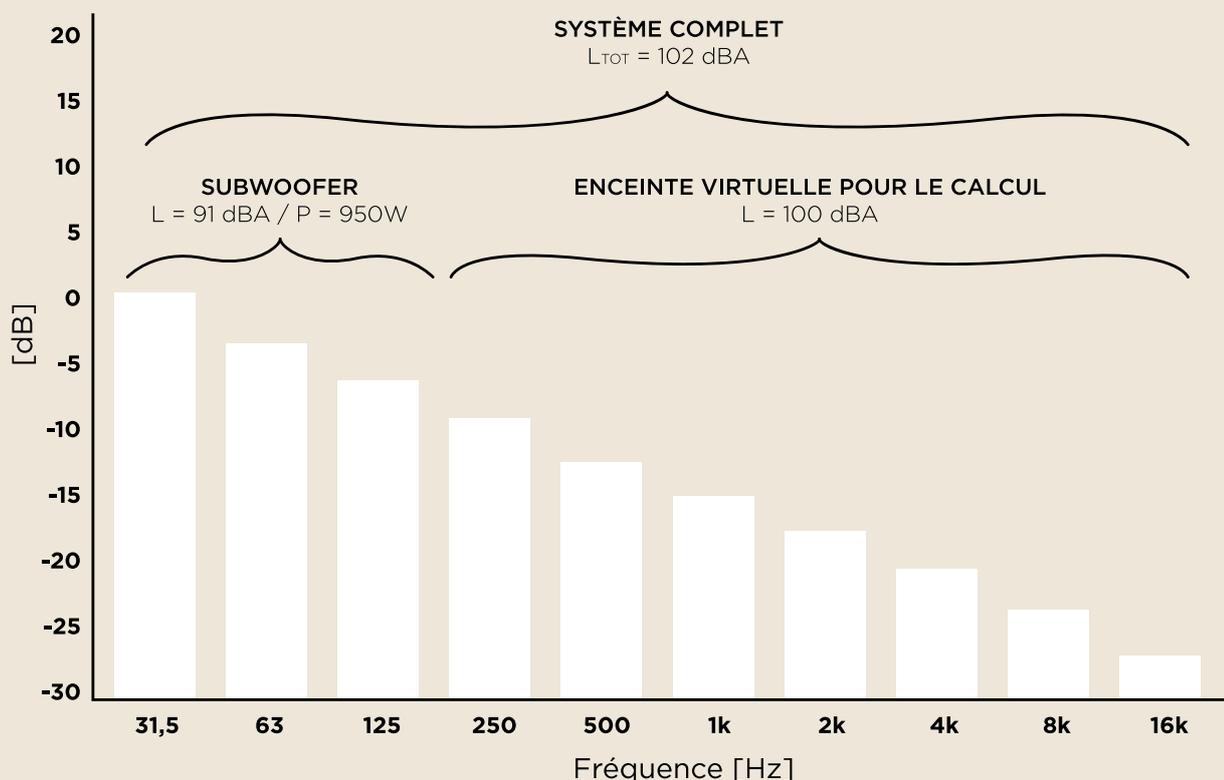


Illustration du calcul de la consommation d'un subwoofer. Le niveau équivalent 102 dBA à 5 m sur la plage 20-200 Hz est de 91 dBA, pour une puissance électrique de 950 Watt. Les fréquences au dessus de 200 Hz sont générées par une enceinte virtuelle (niveau équivalent 102 dBA = 10 dBA). La réponse en fréquence normalisée et équalisée de l'enceinte pour un signal de type bruit rose est affichée en tiers d'octave.

DÉTAILS DU CALCUL

Le calcul de la puissance se fait à partir de l'amplitude de la réponse en fréquence et de l'impédance sous forme complexe de l'enceinte, mesurées en régime petits signaux. En considérant que celles-ci sont connues, quatre étapes de calcul permettent d'arriver au résultat :

La première étape consiste à déterminer L_C , le niveau cible équivalent 102 dBA sur la plage de fréquence concernée pour un bruit rose normalisé à 20 Hz ayant un niveau total de 102 dBA, c'est à dire la proportion de niveau sonore attribuée à cette plage de fréquence.

Deuxièmement, on calcule $L_{U_{in}}$, le niveau en dBA généré par l'enceinte parfaitement égalisée sur la plage de fréquence susmentionnée, lorsqu'alimentée par un signal électrique de type bruit rose normalisé à 20 Hz (auquel est incluse l'égalisation), ayant une tension RMS U_{in} faible (régime petits signaux). On en déduit $U_{in}(f_k)$, la tension RMS d'entrée pour chaque intervalle fréquentiel.

Troisièmement, on détermine la différence de gain ΔL entre le niveau cible L_C et le niveau généré par l'enceinte $L_{U_{in}}$, et on applique ce gain à la tension $U_{in}(f_k)$ afin d'obtenir $U_{req}(102\text{ dBA}_{eq}, f_k)$. **équation (1)**

Quatrièmement, on calcule la puissance totale $P_{elec,tot}(102\text{ dBA}_{eq})$ en sommant la puissance obtenue par point de fréquence, via la courbe d'impédance et la tension d'entrée $U_{req}(102\text{ dBA}_{eq}, f_k)$. **équation (2)**

$$(1) \quad U_{req}(102\text{dBA}_{eq}, f_k) = U_{in}(f_k) \cdot 10^{\Delta L/20}$$

$$(2) \quad P_{elec,tot}(102\text{dBA}_{eq}) = \sum_{k=f_{min}}^{f_{max}} \Re(Z(f_k)) \cdot \frac{U_{req}^2(102\text{dBA}_{eq}, f_k)}{|Z(f_k)|^2}$$

BIBLIOGRAPHIE

IEC, "Sound System Equipment - Part 22: Electrical and Mechanical Measurements on Transducers,» International Standard 60268-22:2020 (2020 Sep.)

S. Bouchet, V. Mouton, "Quantifying Loudspeakers' Power Consumption," *jaudio Eng Soc*, vol 70, no. 7/8, pp. 601-610, (2022 July/August). DOI : <https://doi.org/10.17743/jaes.2022.0019>

J. Jensen, "A New Method for Evaluating Loudspeaker Efficiency in the Frequency Domain," presented at the 131th Audio Engineering Society Convention (2011Oct.), paper 34

W. Klippel, "Loudspeaker and Headphone Design Approaches Enabled by Adaptive Nonlinear Control," *JAudio Eng Soc*, vol. 68, no. 6, pp. 454-464 (2020 Jun.). DOI : <https://doi.org/10.17743/jaes.2020.0037>

F. Rumsey, "Loudspeaker Design: Optimization and Efficiency," *J Audio Eng Soc*, vol. 66, no. 6, pp. 501-505 (2018 Jun.)