

Puissance, rendement et adaptation

Robert BERRANGER, F5NB

Encore un article sur le rendement et l'adaptation, il radote F5NB ! Peut-être, mais on m'a reproché d'être trop "mathématique", alors ici je vous promets de ne faire appel qu'aux formules que tout OM doit connaître : $U=R \times I$ et $P=U \times I$, et leurs combinaisons. Je vais aussi prendre comme exemple un problème concret de sonorisation.

Exposé du problème

Il fallait sonoriser, pour une quinzaine commerciale, deux rues d'une longueur totale de 1 km avec un amplificateur de 30W ⁽¹⁾ et une demi-douzaine de haut-parleurs, **tous identiques**. Les rues qui se croisaient, avec des difficultés de placement des haut-parleurs, entraînaient que ceux-ci ne devaient pas "diffuser" la même puissance sonore. Donc le problème posé consistait d'une part, à se débrouiller avec 30 W maximum et d'autre part, à répartir cette puissance judicieusement.

Solution du problème

Je ne l'ai pas inventée. Pour les trente watts, il suffisait d'utiliser des haut-parleurs "à chambre de compression". Ces haut-parleurs sont composés d'un moteur électromagnétique faisant vibrer une membrane devant un pavillon exponentiel. Ils ont des rendements acoustiques plusieurs fois supérieurs à ceux des enceintes avec H-P classiques ⁽²⁾.

Pour la répartition des puissances, j'ai utilisé la sortie "ligne 100V" de mon ampli et ajouté des transformateurs sur mes haut-parleurs avec plusieurs prises au secondaire (côté HP) ce qui permet d'ajuster la puissance prise par le haut-parleur à la ligne 100V ⁽³⁾.

OK, mais comment cela fonctionne-t-il ?

Fonctionnement du système

a) Côté amplificateur

C'était encore un amplificateur à lampes, mais cela vaudrait pour n'importe quel amplificateur. Voir sur la figure 1 le synoptique de celui-ci (schéma de principe).

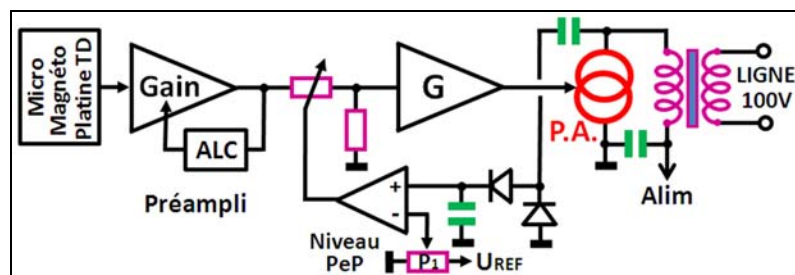


Figure 1 : Synoptique d'un ampli de sonorisation publique

Normalement, le niveau de sortie PeP est constant (P1 côté U_{REF}), et alors la ligne est effectivement une source de tension de 100 Veff. Mais on peut avoir, pour une raison ou une autre, besoin de baisser la puissance générale, et alors on se sert de P1.

b) Côté haut-parleurs

On procède en deux temps. Dans un premier temps, on répartit les 30 W (moins une marge de puissance) équitablement sur les six haut-parleurs. Cela nous fait par exemple une puissance de 4 W par haut-parleur (6 W en réserve). En pratique, avec des haut-parleurs ayant une impédance de 16 Ω , cela revient à connecter chaque H-P sur la prise 8V du transformateur de ligne ⁽⁴⁾. Démonstration pour les élèves en préparation à la licence : si $U=R.I$ et $P=U.I$, alors $U = \text{racine de } (P.R)$ car $P=R.I^2$ et $P=U^2/R$. Donc $U = \text{racine de } (4 \times 16) = 8V$.

Dans un deuxième temps, on met un disque de variété (signal bien compressé) et on se déplace dans les rues. En fonction de la répartition des niveaux sonores, on modifiera les prises en conséquence sur les transformateurs. Par exemple sur l'un on passera sur "10V" pour augmenter la puissance et sur un autre on passera sur "6V" pour diminuer la puissance. On fera quand même attention à ne pas dépasser les 30W. Sinon on refait la manip avec une marge de sécurité plus grande ⁽⁵⁾.

Et l'adaptation ?

Peut-on parler d'adaptation ? On peut calculer l'impédance de charge optimale : $R=U^2/P$, soit ici $100^2/30 = 333 \Omega$.

Peut-on définir une impédance de la source ? Cela se complique beaucoup. En effet, on a dit que la source était une source de tension (grâce à la contre réaction d'enveloppe). Oui, mais justement, cela concerne la puissance P_eP (la crête de l'enveloppe), pas la puissance instantanée. Or pour celle-ci, en admettant que le transformateur de sortie soit parfait, la source est une source de courant qui serait idéale si le composant de l'ampli de puissance l'était aussi. Source de tension ou source de courant, cela n'a aucune importance si la charge est une résistance pure. Par contre si la charge est plus ou moins capacitive ou inductive, cela va avoir des effets différents sur la courbe de réponse en fréquence. Mais je m'arrête là, car j'ai promis de rester simple.

En conclusion on peut dire qu'en statique (puissance CW), la source se comporte comme une source de tension (presque) parfaite et qu'en dynamique (puissance variable), elle se comporte comme une source de courant (presque) parfaite. Donc son impédance interne n'est jamais adaptée à la charge, qui par ailleurs est variable selon l'installation. Peut-on en déduire que le rendement sera mauvais comme certains le pensent ? C'est ce que nous allons voir.

Et le rendement ?

L'amplificateur étant prévu pour sortir 30 Watts efficaces, on peut dimensionner l'alimentation pour avoir un rendement optimal :

$U(\text{alim}) = U_{\text{crête}}(\text{charge}) + U_{\text{seuil}}(\text{composant})$. Soit pour nous, avec un MosFet : $U_{\text{alim}} = 141V + 5V$ (seuil drain) = 150 V en prenant une petite marge.

En plus du seuil du MosFet, le rendement va encore être diminué à cause de sa résistance interne drain-source qui se retrouve en parallèle sur la charge, soit par exemple 8 k Ω .

Le rendement est alors diminué de **3,5%** à cause du seuil ($5/146$) et de **4%** à cause de la résistance drain-source ($333/8333$), soit un rendement global d'environ $100 - (3,5+4) = \mathbf{92,5\%}$. C'est très bon. Ce rendement est à pondérer avec le rendement de la classe de fonctionnement de l'ampli. C'est un rendement maximum. On ne peut pas faire mieux, compte tenu du composant utilisé.

Comportement du rendement en fonction de la charge.

Supposons que nous ne connectons que trois haut-parleurs sur les prises 8V. La puissance globale dans la charge sera de 3 fois 4 watts = **12W**, soit une impédance de charge de **833 Ω** ($100^2/12$). Alors le courant débité par la source dans la charge sera diminué de manière à

conserver une tension de 100V à ses bornes. La tension de seuil drain va baisser à 4,5V (baisse de rendement = 3,1%) et la résistance drain diminuera le rendement de $883/8883 = 9,4\%$. Soit un rendement global de $100 - (3,1+9,4) = 87,5\%$ (à comparer aux 92,5% pour 30W). Le rendement diminue très peu. Il diminuerait plus sérieusement pour de très faibles puissances mais comme il est relatif, cela ne représente pas beaucoup de watts en absolu. On a une diminution du rendement bien plus importante en fonction de la forme d'onde, quand on passe d'un signal CW à un signal téléphonique.

Donc tout se passe bien si l'on augmente la résistance de charge. Et si on la diminue ? Alors rien ne va plus. En effet, on n'a aucune "réserve de puissance" dans la source et on écrête. Le système n'est plus linéaire. Quand la source est complètement désadaptée (source de tension parfaite ou source de courant parfaite) la diminution de la puissance maximale ⁽⁶⁾ en fonction de la désadaptation de la charge se fait conformément à la figure 2 (attention aux échelles des résistances de charge qui sont inversées).

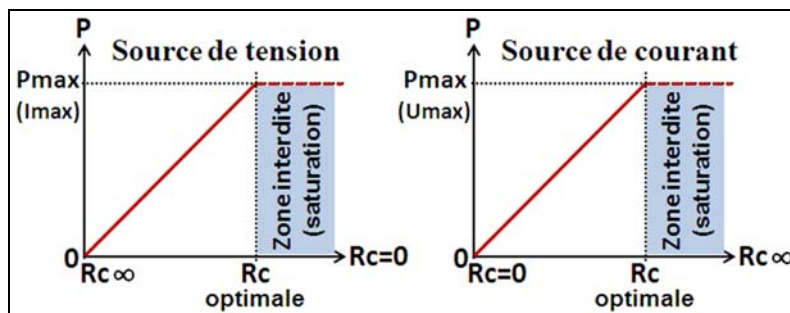


Figure 2 : Puissance et impédance de charge selon les types de sources

On me dira "oui, vous prenez en exemple un amplificateur BF pour démontrer ce qui se passe avec un amplificateur HF, voire Hyper, et ce n'est pas la même chose". Je répondrais qu'il n'y a pas de différence de principe entre 50 Hz et 50 GHz. Si différences il y a, elles sont dues à la technologie des composants. Les comportements électriques et électromagnétiques sont les mêmes. La démonstration ci-dessus vaut aussi bien pour une centrale EDF que pour un ampli RF.

Dans le cas de notre amplificateur, on pourrait améliorer le système et éviter la saturation en introduisant une deuxième boucle de régulation qui se ferait à partir du courant consommé dans la charge avec une action sur U_{REF} . On pourrait la dimensionner de façon que la puissance de sortie reste constamment au maximum sans saturation. C'est-à-dire que quand le courant dépasserait le courant nominal, le système baisserait la tension. On pourrait alors mettre autant de haut-parleurs que l'on voudrait, ils se partageraient la puissance de 30W. La contrepartie résiderait dans la baisse de rendement qui demanderait de dimensionner l'alimentation et le P.A. en conséquence ⁽⁷⁾. Il faudrait aussi que le composant du PA et l'alimentation puissent fournir le double du courant maximum sur charge nominale.

Conclusion

L'adage qui dit "la transmission de puissance dans une charge sera maximum quand la source sera adaptée et donc le rendement aussi" ne s'applique pas aux systèmes à grand rendement ⁽⁸⁾. En effet, si l'impédance de source est égale à celle de la charge, on a au mieux un rendement de 50%. Ceci est évident avec la source linéaire parfaite qu'est une antenne en réception. En effet, la hauteur effective (en mètres) est le quotient entre la fém (V) et le champ E (V/m). Et la hauteur efficace (en mètres) est le quotient entre la d.d.p. (V) aux bornes de la charge et le champ E (V/m). Et lorsque celle-ci est parfaitement adaptée à la résistance de rayonnement de l'antenne (partie réactive compensée), le rapport entre les deux est de 0,5 (Hauteur efficace /

Hauteur effective), soit un rendement de 50%. C'est le rendement maximum d'un aérien en réception (les autres 50% de la puissance captée sont re-rayonnés).

Bibliographie

Articles F5NB publiés dans Radio-REF :

"Rendement des amplis HF de puissance", février 2005.

"Puissance Pep, puissance moyenne", novembre 2007.

"Rendement et adaptation, octobre 2014.

Ces articles sont également consultables et téléchargeables sur le blog de F6KRK (www.blog.f6krk.org), dans la catégorie "Articles membres" puis "F5NB".

Notes

- (1) *Non, non, pour les aficionados des amplis de sonorisation de 1 kW, il ne s'agit pas d'une erreur.*
- (2) *Il faut admettre que leur bande passante du côté des graves est très limitée et dans un système Haute fidélité, ils ne sont employés que pour les "médium-aigus", avec un woofer "Bass-reflex" pour les graves.*
- (3) *Ces transformateurs étaient en réalité installés à demeure sur les H-P. Noter que tous les transformateurs sont connectés en parallèle sur la ligne.*
- (4) *Sur certains systèmes [HP+transfo], ce dernier était gradué directement en puissance (car on connaissait l'impédance du HP).*
- (5) *On pourra tolérer un certain écrêtage sur les crêtes de puissance. Les H-P à chambre de compression ne sont pas par ailleurs des exemples de haute fidélité. Mais attention à ne pas exagérer comme on l'entend (douloureusement) parfois. Cela vaut aussi pour la modulation de certains OM qui confondent "écrêtage" avec "compression".*
- (6) *Pour rester linéaire, c'est-à-dire sans saturation.*
- (7) *On retrouve notre principe qui veut que lorsque l'impédance de source s'écarte de zéro ou de l'infini, le rendement diminue. Noter que je n'ai pas développé le sujet car cela nous entraînerait trop loin.*
- (8) *C'est le cas d'une centrale électrique pour laquelle on réduit autant que l'on peut la résistance interne du générateur. Imaginons un instant qu'une centrale de 1MW ait un rendement de 50%, pour le plaisir de la voir adaptée à la charge...*