

Impédance de charge et contre-réaction

Par Lucien CHRÉTIEN

Nous avons montré (1) que l'application d'un taux de contre-réaction de 20% sur un étage final avait pour conséquence une modification considérable des caractéristiques de la lampe.

D'une penthode dont la résistance interne est de 50.000 ohms, la contre-réaction fait une triode dont la résistance est 100 fois plus petite : de l'ordre de 500 ohms.

Cela pose immédiatement une question d'extrême importance : celle de l'impédance de charge. La charge optimum d'un tube EL3 est de 7.000 ohms...

Quant à celle d'une triode réelle de 550 ohms, elle ne dépasserait vraisemblablement pas 1.500 ohms.

Et pourtant, on ne signale nulle part que l'introduction de contre-réaction dans un étage final doive s'accompagner d'une modification de l'impédance d'utilisation.

Est-ce parce que notre lampe n'est qu'un fantôme, une lampe virtuelle ? La chose mérite assurément d'être examinée en détail.

De l'impédance de charge optimum

Si l'on considère l'impédance de charge optimum, on peut diviser les praticiens en deux classes principales :

1) Ceux qui s'en... moquent éperdument.

2) Ceux pour qui l'impédance optimum est un dogme intangible.

Les premiers n'hésitent pas à changer le transformateur d'adaptation, d'un haut-parleur sans s'occuper du type de lampes, ni de l'impédance de la bobine mobile. C'est au petit bonheur.

Et l'on est bien obligé de constater que « ça marche ». Parfois, « ça » pourrait, certes, marcher beaucoup mieux...

Les seconds ont un respect religieux des chiffres indiqués et, pour rien au monde, ne changeraient un transformateur fournissant une impédance de 8.000 ohms quand le constructeur de lampes indique 7.000 ohms.

Comme toujours, la saine raison est quelque part, entre les deux extrêmes et sur un plan supérieur.

Notre intention n'est pas d'examiner ici cette question en détail, mais pour aborder le sujet que nous nous sommes choisis, il nous faut bien en rappeler l'essentiel.

Une définition

L'impédance de charge optimum n'est pas l'impédance qu'il faut insérer dans le circuit anodique du tube pour en tirer le maximum de puissance. En réalité, nous n'avons que faire de la puissance, si elle s'accompagne d'un excès de distorsion.

Certes, nous voulons de la puissance, mais nous voulons aussi de la fidélité.

Les deux choses ne vont généralement pas ensemble. Il nous faut donc nécessairement accepter un compromis. Il en résulte que nous pourrions définir l'impédance de charge optimum comme celle qui fournit le maximum de puissance pour le minimum de distorsion.

C'est une définition un peu vague sans doute, mais il est impossible de faire autrement.

En pratique on est amené à chercher l'impédance donnant le maximum de puissance, après quoi on modifie le chiffre indiqué pour atteindre un taux raisonnable de distorsion, en sacrifiant une fraction de la puissance, si c'est nécessaire.

Mais nous devons maintenant faire la distinction entre tubes à faible impédance, c'est-à-dire triodes et ceux à forte impédance, soit tétrodes et penthodes.

Cas de la triode

Le problème peut se poser de plusieurs manières :

1°) On donne la tension d'attaque, et on est libre de choisir la tension anodique ;

2°) On donne la tension anodique, et on est libre de choisir la tension d'attaque ;

3°) On peut agir sur la tension anodique sans limitation de puissance dissipée ;

4°) ...comme ci-dessus, mais avec une limitation.

On arrive ainsi à des valeurs différentes...

Le cas le plus répandu est le deuxième, c'est celui qui se pose dans la plupart des récepteurs et des amplificateurs.

Pour faire le calcul, on suppose que les caractéristiques sont droites et régulièrement espacées. On arrive ainsi à la relation :

$$Z_{op} = 2 R_i$$

L'impédance de charge optimum est donc simplement égale au double de la résistance interne.

Ainsi, un tube 2A5 pour lequel $R_i = 800$ ohms, devrait avoir une impédance de charge de 1600 ohms.

Mais cela n'est valable que pour des caractéristiques droites et on constate qu'en pratique l'adoption de $Z_{op} = 1600$ conduit à une distorsion relativement grande, au maximum de puissance.

La distorsion, pour un tube triode, est surtout produite par l'harmonique 2. Or, le taux d'harmonique diminue d'autant plus que l'impédance de charge est plus élevée.

Il est facile de s'en rendre compte en plaçant le diagramme de charge dans le réseau des caractéristiques (fig. 1a). Il y a production d'harmonique 2 par suite de la courbure inférieure des caractéristiques. Par exemple, le segment KL n'est pas égal à MN.

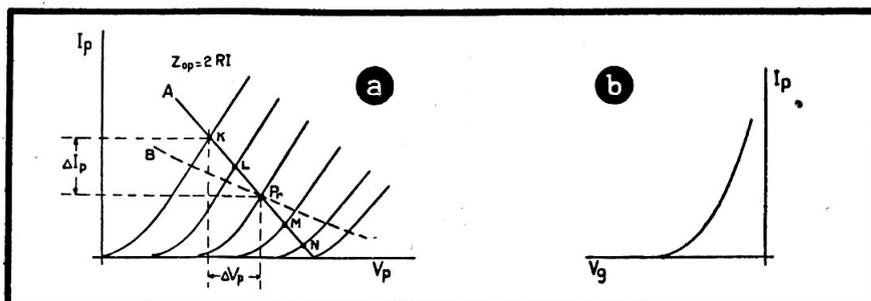
Cette observation est encore plus évidente si l'on trace la caractéristique dynamique (fig. 1b). Celle-ci a une allure parabolique.

On voit facilement qu'on améliore la situation en rapprochant la droite de charge de l'horizontale, ce qui correspond évidemment à une augmentation de la charge.

En même temps, on réduit la puissance. Toutefois, cette réduction est d'abord très faible, parce que la diminution dans la variation d'intensité ΔI_p , est à peu près compensée par l'augmentation ΔV_p dans la variation de tension.

La figure 2 indique l'allure générale des courbes de distorsion et de puissance. Pour les faibles valeurs de Z_p , la distorsion croît très vite.

Elle est encore notable pour $Z_p = 2 R_i$.



(1) Voir « Evocation d'une triode fantôme », du même auteur dans Toute la Radio, n° 121, novembre 1947.

En dépassant cette valeur, la distorsion est beaucoup plus faible sans que le sacrifice de puissance soit excessif.

C'est ainsi que l'impédance recommandée pour le tube 6A5, n'est pas de 1.600 ohms, mais de l'ordre de 2.400 ohms...

Le cas de la penthode

On admet implicitement que l'impédance de charge est toujours négligeable par rapport à la résistance interne et que, d'autre part, la variation de tension instantanée de la tension anodique peut atteindre la totalité de cette tension.

L'impédance de charge doit donc être telle que la tension anodique instantanée soit nulle quand l'intensité instantanée est maximum.

D'où l'on déduit immédiatement, en classe A :

$$Z_{op} = \frac{V_p}{I_p}$$

Cette condition correspond ici au minimum de distorsion. Celle-ci demeure notable et nous avons eu l'occasion de souligner dans un autre article qu'elle est surtout représentée par une harmonique 3, très mal tolérée par l'oreille...

Nous donnons, figure 3, l'allure des courbes de puissance et de distorsion pour un tube penthode. On voit que, pour la valeur optimum, l'harmonique 2 s'annule alors que l'harmonique 3 croît dans le même sens que la valeur de l'impédance de charge.

On notera que la résistance interne du tube n'intervient pas du tout dans le calcul. La raison en est bien simple : le principe même de la détermination suppose que R_i est infiniment grand. Il y aurait fort à dire là-dessus, quand on emploie les tubes modernes.

Nous sommes maintenant en mesure d'examiner le cas du tube penthode qu'un taux suffisant de contre-réaction transforme en triode.

Une erreur de raisonnement

On pourrait tout simplement raisonner ainsi : l'application de la contre-réaction transforme notre penthode en une triode dont la résistance interne est

de 550 ohms environ. En conséquence, l'impédance de charge optimum théorique doit être de 1.100 ohms et, en pratique, de l'ordre de 1.600 ohms.

Nous allons montrer que ce raisonnement est tout à fait inexact et, qu'en pratique, il ne faut guère modifier l'impédance de charge.

Considérons d'abord le réseau normal du tube sans contre-réaction (fig. 4). La charge normale de 7.000 ohms correspond à la ligne droite A-B-C.

Le point de repos P_r correspond au maximum de dissipation et est situé, par conséquent, sur la branche d'hyperbole $W_a = 9$ watts.

On voit immédiatement pourquoi le tube produit une harmonique 3 de grande amplitude : c'est à cause de la chute rapide de courant anodique dans la région A-B.

La forme de la caractéristique dynamique est indiquée figure 5. La présence d'un point d'inflexion est la cause initiale de la grande amplitude de l'harmonique 3.

Charge optimum dans le réseau virtuel

Traçons maintenant les caractéristiques du tube triode fantôme. Cherchons comment devrait être située la ligne de charge pour fournir les meilleurs résultats. Nous rappelons les faits essentiels relatifs à ce réseau :

a) Il n'est valable que pour $r = 20$ 0/0 ou 0,2 ;

b) Il n'est valable qu'en courant alternatif ;

c) Le point de repos P_r n'est pas changé ;

d) La frontière de la « zone interdite » correspondant à la naissance du courant grille, est fixée par la caractéristique *penthode*.

Nous voyons, sur le graphique (fig. 4), que le point de repos P_r correspond pour le tube, fantôme à une tension V_p de l'ordre de -58 volts.

Supposons que, nous laissant emporter par le fallacieux raisonnement indiqué plus haut, nous voulions diminuer l'impédance de charge. Cela correspond à redresser la ligne de charge vers la verticale, comme en KP_r , par exemple.

Il est évident que, vers le bas, l'excur-

sion de grille est limitée au point L qui correspond à la coupure du courant anodique. Ce point correspond sensiblement à la courbe $V_p = -80$ volts. En conséquence, la tension de pointe admissible est de $80 - 58 = 22$ volts seulement.

Puissance utile produite

Considérons la figure 6. Le point de repos est P_r . La droite de charge correspondant à l'impédance Z_{op} est HP_rS . L'excursion de grille est telle que le point de fonctionnement se déplace de H en S au maximum. Au point H, correspond l'intensité de pointe I_{max} , au point S, l'intensité minimum I_{min} .

On peut facilement montrer que la puissance produite est :

$$W = \frac{1}{8} (I_{max} - I_{min})^2 Z_{op}$$

Appliquons cette formule au cas étudié. Si nous admettons que le point de fonctionnement se déplace jusqu'au point L, on a : $I_{min} = 0$. De l'autre côté, par symétrie, le point de fonctionnement se déplace jusqu'à la courbe $58 - 22 = 36$ volts.

L'intensité correspondante est d'environ 75 mA.

La puissance produite est donc :

$$W = \frac{1}{8} (0,075)^2 Z_{op}$$

L'impédance relative à notre droite KP_rL est d'environ 2.200 ohms.

Donc :

$$W = \frac{1}{8} (0,075)^2 \cdot 2.200 = 1,5 \text{ W environ.}$$

Ce qui est beaucoup trop peu pour un tube de 9 watts, même quand ce tube est un fantôme de tube triode.

Augmentation de la charge anodique

Avec un tube penthode, il est très dangereux de s'écarter de la valeur de charge optimum déterminée par le calcul. On constate, en effet (voir fig. 3) que le taux d'harmonique 3 et le taux d'harmonique 2 augmentent très vite.

S'il est impossible de réaliser la valeur voulue, il est préférable de choisir une charge *plus faible*. En effet, on augmente l'harmonique 2, mais on diminue l'harmonique 3. Or, cette dernière est beaucoup plus gênante.

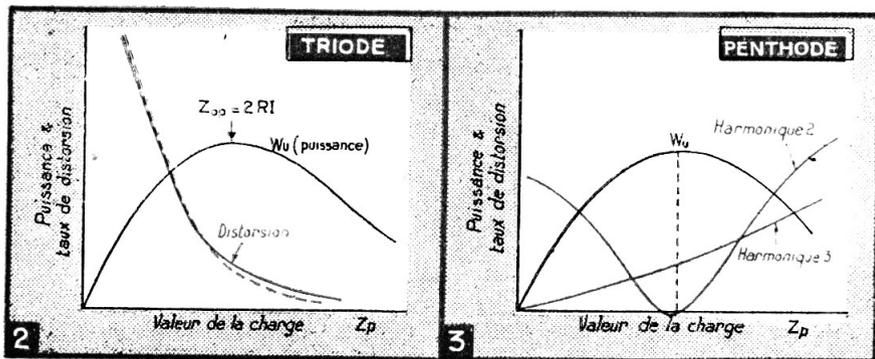
D'autre part, la chute de la puissance utile W_a n'est pas très brusque, comme on peut le voir sur notre graphique.

Ces considérations n'ont plus cours pour le tube fantôme : la distorsion est très faible.

On peut même se demander si, au contraire, il n'y aurait pas intérêt à augmenter légèrement la valeur de Z_p .

C'est, en effet, ce que l'on constate en pratique. Dans le cas étudié, on pourrait, par exemple, adopter une charge de 10.000 ohms.

On constaterait une légère augmentation de puissance utile.



En effet, il faut que le symétrique du point A, par rapport à P_r, ne soit pas situé au-dessous de l'axe des V_p... ce qui n'aurait aucun sens. Or, cette condition n'est pas exactement respectée avec Z_p = 7.000. Il faut donc 10.000 ohms.

Tension d'attaque de l'étage

Notre réseau de caractéristiques fictives nous permet encore de déterminer la tension d'attaque nécessaire pour tirer du tube toute la puissance qu'il peut fournir.

Admettons, pour simplifier, que nous conservions la charge de 7.000 ohms représentée par la droite A-B-C... etc...

La caractéristique virtuelle passant au point A correspond à V_g = -7. Il faut donc prévoir une tension d'attaque de 58 - 7 = 51 volts environ.

Il s'agit naturellement de la valeur de crête.

Il faudra donc que l'étage précédent puisse fournir sans distorsion appréciable une tension de crête de 50 volts environ. Il serait, en effet, inutile de corriger la distorsion de l'étage final si on devait la faire réapparaître dans l'étage précédent.

Notons, en passant, qu'un tube de réception du type courant peut fournir cette tension sans difficulté. On réalise facilement un gain par étage de 150 avec une penthode dite « de tension ». Il en résulte que l'amplificateur constitué par une penthode d'entrée et notre étage à 20 0/0 de contre-réaction donnera toute sa puissance pour une tension d'entrée de pointe de 50/150 = 0,33 V.

La valeur efficace, en tension sinusoïdale, serait de 0,22 volt environ.

C'est moins que ne fournit normalement un détecteur diode fonctionnant dans les meilleures conditions.

A propos de la polarisation

Des lecteurs s'étonneront peut-être en constatant qu'on applique une tension de pointe de 50 volts à une lampe polarisée à -6 volts. Cela prouvera simplement qu'ils n'ont pas compris le mécanisme de la contre-réaction et qu'ils doivent, par conséquent, retourner à l'école.

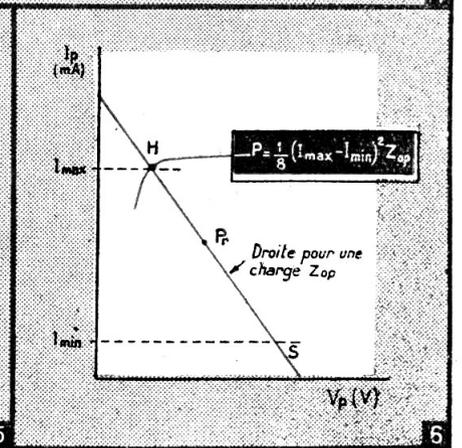
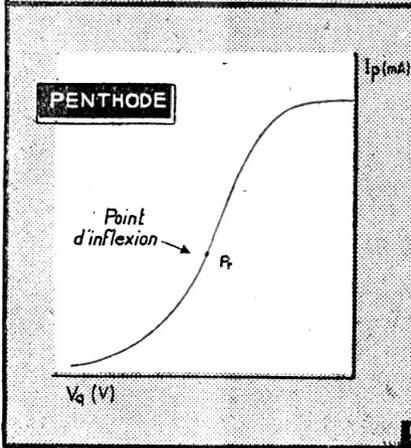
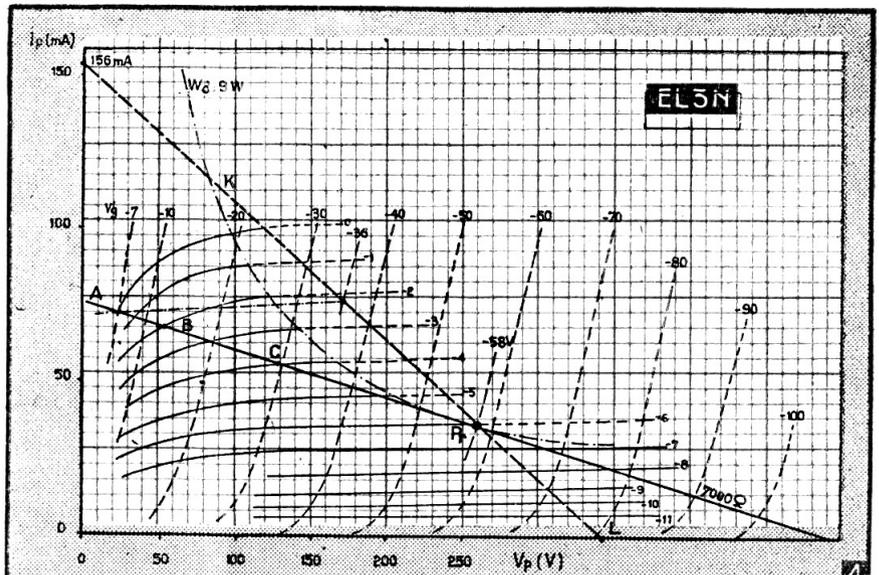
Quand j'applique 51 volts au circuit de grille, la tension de contre-réaction est de 45 volts, si bien que la tension entre grille et cathode est de 51 - 45 = 6 volts.

La tension recueillie aux bornes de la charge est alors de 225 volts.

Le taux de réaction étant de 0,2, la tension de contre-réaction est de 225 × 0,2, c'est-à-dire exactement les 45 volts prévus.

Détermination de la distorsion

On pourrait naturellement utiliser le graphique pour calculer le taux de distorsion relatif aux différentes harmoni-



ques. Les bases du calcul seraient exactement les mêmes que pour un réseau normal.

En guise de conclusion

Nous pensons avoir montré clairement, dans ces deux articles, que la contre-réaction de tension transformait une penthode ou une tétrade, en l'équivalent d'une lampe triode.

Ce n'est pas seulement une vue de l'esprit, puisqu'on peut tracer très simplement le réseau de caractéristiques de ce tube, que nous avons appelé « virtuel » ou « fictif ».

On peut, à l'aide de ce réseau, expliquer les propriétés spéciales des étages à contre-réaction, déterminer graphiquement la puissance utile, le taux de distorsion, la tension d'attaque, etc... Nous avons montré aussi que l'impédance optimum du tube fictif n'est pas notablement différente de celle du tube penthode ou tétrade réel. Contrairement à ce qu'on pourrait supposer, il faudrait augmenter la charge plutôt que de la diminuer.

Mais tout cela amène une question

nécessaire... Est-il utile de construire un tube penthode, plus compliqué, plus coûteux qu'une triode pour le convertir, au moyen d'un circuit compliqué, en une triode fantôme ? La raison ne commanderait-elle pas d'utiliser directement un tube triode ?

L'auteur avoue avoir un faible tout particulier pour la triode... Il ne saurait donc être taxé de partialité à l'égard des tétrades et penthodes. Et cependant, il doit conclure que la triode fantôme est une triode idéale. Son rendement anodique est pour une distorsion donnée, plus élevé que celui d'une triode réelle. Ses caractéristiques sont plus droites.

Toutefois, on doit, d'un autre côté, reconnaître que le transformateur d'adaptation de la triode fantôme est beaucoup plus délicat à construire que celui d'une triode réelle...

Enfin, s'il est peu indiqué d'appliquer la contre-réaction à un étage final triode, il est parfaitement défendable de l'utiliser sur un amplificateur complet, dont l'étage final est équipé avec des triodes.

Le débat demeure donc ouvert...

Lucien CHRETIEN.