

LE TUBE ELECTRONIQUE

DANS LES APPLICATIONS AUDIO

Une puissante évolution, de nature aussi bien économique que technique vient de prendre son essor dans le domaine des télécommunications: le rêve longtemps caressé, le relais téléphonique, l'amplificateur fidèle des faibles courants alternatifs, est enfin réalisé, et réalisé d'une façon qui comble les espérances les plus audacieuses (H.Barkhausen, Tubes électroniques, 1921.)

SOMMAIRE

INTRODUCTION

HISTORIQUE

FONCTIONNEMENT GENERAL DE LA LAMPE

- I Le courant électrique
- II L'effet thermoélectronique
- III La diode
- IV La triode
- V Point de fonctionnement et distorsion
- VI Valeur de cut-off
- VII Alimentation
- VIII Précisions
- XIV La double triode
- XV La penthode

COMPARAISON OBJECTIVE DES LAMPES ET DES TRANSISTORS

- I Généralités
- II Courant de repos
- III Bruit de fond
- IV Coefficient d'amplification
- V Résistance d'entrée
- VI Résistance interne et résistance de sortie
- VII Droite de charge
- VIII Les classes d'amplification
- XIV Pente ou transconductance
- XV Distorsion
- XI Contre-réaction
- XII Autres phénomènes
- XIII Effet capacitif
- XIV Linéarité en fréquence
- XV Le transformateur de sortie
- XVI Les amplificateurs de guitare

MISE EN PRATIQUE

- I Présentation
- II Alimentation
- III Circuit de cathode
- IV Circuit de grille
- V Circuit d'anode et haute tension
- VI Entrées/sorties
- VII Guide d'utilisation
- VIII Mesures et tests
- XIV Difficultés et problèmes

ECOUTE CD

CONCLUSION

INTRODUCTION

Pourquoi avoir choisi ce sujet? Tout d'abord par curiosité, et par volonté de faire la lumière sur le « son » de la lampe. Il me semblait également intéressant, pour moi, de « creuser », au travers de l'étude de la lampe, un aspect aussi important, dans le domaine de l'audio, qu'est l'électronique.

L'objectif de ce mémoire est à la fois d'offrir un enseignement complet du fonctionnement du tube électronique mais également des preuves concrètes quant à ses vertus musicales.

Pour cibler le propos de ce mémoire, voici en résumé son contenu et organisation.

Je retracerai tout d'abord, au fil de découvertes dans les domaines de la physique et de l'électricité, la naissance et l'histoire du tube électronique.

Nous verrons ensuite les détails plus théoriques allant de bases en électricité à la technologie m'me du tube. Dans cette partie, mon but est de synthétiser de manière complète et claire les connaissances nécessaires à la compréhension des différents points abordés par la suite.

Je ferais ensuite une comparaison objective de la lampe et du transistor dans les applications audio en me demandant quelles sont les différences purement électroniques qui peuvent jouer (dans le montage et dans le composant lui-m'me) sur la restitution du son.

Pour concrétiser cette étude théorique, j'expliquerais la confection et le fonctionnement d'un appareil audio à lampe de type « effet » en expliquant en détail les différentes étapes de la fabrication , le choix des composants, les problèmes rencontrés, etc...

Un certain nombre de tests effectués avec cet appareil seront catalogués sur un support CD.

Suivra un comparatif, cette fois subjectif (écoute CD), de différents extraits sonores amplifiés par une lampe, puis traversant un plugs-in (numériques) de simulation.

HISTORIQUE

En 1880, Thomas Alva Edison invente la lampe à incandescence. Il s'intéresse surtout aux phénomènes lumineux et permet le premier éclairage public à l'électricité.

C'est lui qui découvre qu'un filament chaud émet des électrons, formant ainsi un nuage électronique autour de lui: on appellera cela l'effet thermoélectronique ou effet Edison.

Le scientifique britannique John Ambrose Fleming montre pour la première fois en 1903, un dispositif utilisant cette propriété thermo-électronique. Un filament chaud dans une ampoule vide d'air éjecte des électrons de sa surface. Si une électrode supplémentaire est placée dans l'ampoule et rendue plus positive que le filament chaud, un courant continu d'électrons traverse le vide. Cette deuxième électrode, nommée plaque, n'émettant pas d'électrons mais ne pouvant qu'en recevoir, ce courant ne peut aller que dans un sens: c'est le principe de la diode. Elle-ci fut destinée au redressement du courant alternatif et à la détection des ondes à haute fréquence.



En 1907, Lee De Forest ajoute une troisième électrode au montage, appelée grille, et placée entre le filament et la plaque. Le principe de la diode à grille interposée permettait, grâce à une polarisation variable de la grille par rapport au filament, de contrôler le courant d'électrons traversant l'ampoule. Il s'aperçoit que cette électrode donnait de bons résultats pour la détection de signaux provenant d'une antenne. Il inventa en fait la triode qui permit l'amplification électronique et qui révolutionna les applications à lampes. Il devenait possible d'amplifier des signaux de basse ou de haute fréquence, de réaliser des circuits oscillateurs divers, des émetteurs radio, et trouva de nombreuses applications (militaires, industrielles,...)

Walter SCHOTTKY créa la première tétrode en 1915 en ajoutant encore une grille (grille écran) à la triode. La pentode et les autres lampes multigrilles apparurent dans les années qui suivirent. La forme des lampes évolua de l'ampoule sphérique ou ovale vers le tube cylindrique, mieux adaptée à la fabrication en série. Entièrement basé sur le principe de Fleming et de De Forest, le tube cathodique, développé en 1923, lance une période de grand succès pour le marché des lampes. En 1942, on assiste à la première transmission radar utilisant des amplificateurs à tubes. En 1946, naît le premier ordinateur électronique: l'ENIAC. Il est composé de 18000 tubes et peut traiter 5000 calculs par seconde.

Le transistor voit le jour en 1947. Sa taille, son principe et ses qualités le font devenir un élément incontournable d'un circuit électrique. En 1957, le lancement de Sputnik et la conquête spatiale vont relancer le tube puisque les puissances nécessaires augmentent et les fréquences de travail aussi.

Ce n'est qu'après la découverte et la mise au point du tube électronique que la radio est devenue un moyen de télécommunication universellement utilisé et que l'électronique a pu faire ses premiers débuts.

Aujourd'hui, les lampes d'amplification basse fréquence ou basse puissance ont toutes été remplacées par les transistors, excepté dans certains domaines comme celui de l'audio.

Par contre, les tubes HF assurent des puissances qu'aucun transistor ne peut supporter, dans des applications comme la diffusion radiophonique par exemple.

FONCTIONNEMENT GENERAL DE LA LAMPE

I Le courant électrique

La matière est composée d'atomes. Un atome est composé d'un noyau (charge électrique positive) autour duquel gravitent des électrons (porteurs d'une charge électrique négative). Les charges électriques de signe contraire s'attirent entre-elles et les charges électriques de même signe se repoussent. Dans les corps dits "conducteurs" (en particulier les métaux), certains électrons ne restent pas liés à leur atome respectif, mais peuvent se déplacer librement dans tout le volume de ce corps. Ce sont les "électrons libres". C'est le courant électrique (noté I et exprimé en Ampère) qui traduit le déplacement d'électrons libres à travers un circuit composé de corps conducteurs.

Pour provoquer ce déplacement d'électrons, il faut qu'un générateur exerce une pression sur les électrons. Cette « pression » est plus communément appelée tension (notée U et exprimé en Volts).

La Loi d'ohm donne la relation entre la tension U et le courant I dans le circuit: $U=R.I$ (ou R est la résistance en Ohms que le circuit oppose au passage du courant)

Le théorème de Tevenin, dicte, en substance, qu'un courant alternatif et un courant continu, dans un circuit, se superposent. Dans un montage électrique, on utilisera un condensateur en série pour ne conserver uniquement que le courant alternatif.

II L'effet thermoélectronique

Si un corps conducteur est chauffé, l'agitation de ses atomes devient telle que des électrons libres sont expulsés à l'extérieur. Le conducteur se trouve alors entouré d'un "nuage d'électrons". Cette propriété remarquable est appelé effet Edison. Ces électrons ne peuvent pas s'éloigner du conducteur, puisque les noyaux (chargés positivement) des atomes qu'ils ont quittés, les attirent à nouveau vers le conducteur.

III La diode

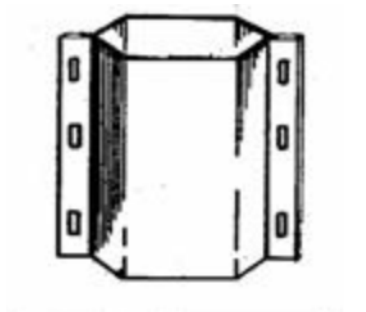
Dans une ampoule de verre dans laquelle on a réalisé un vide parfait (pression de l'ordre de 10 à 6 mm de mercure), on place un filament, qui est destiné à chauffer une première électrode. Sous l'effet du chauffage, des électrons sont émis par cette électrode (du fait de l'effet thermoélectronique) et peuvent donc se déplacer dans l'ampoule sans se heurter aux molécules de l'air.

Cette électrode (appelée cathode) est constituée d'un petit tube de nickel revêtu d'oxyde de baryum, matériaux qui favorisent l'émission d'électrons à des températures inférieures à 1000°C. Le filament, généralement en tungstène est isolé par un revêtement réfractaire glissé à l'intérieur du petit tube. Dans les toutes premières diodes, c'est le filament lui-même qui produisait le nuage électronique (diodes à chauffage direct).

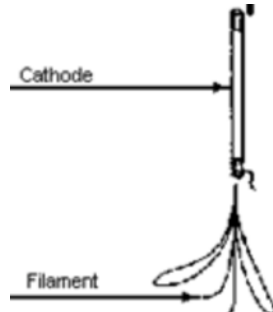
Une deuxième électrode dite "plaque" ou "anode" est placée à proximité de la cathode. La quantité d'électrons augmente à mesure que la température du filament croît. Lorsqu'une tension positive est appliquée à la plaque métallique, par rapport au filament connecté au négatif, les électrons mis en orbite sont attirés par cette plaque. Ceci est dû au potentiel élevé par rapport à la cathode qui est appliqué sur cette électrode. On voit qu'il s'établit un déplacement d'électrons, c'est-à-dire un courant électrique de la cathode vers l'anode, et cela dans une seule direction possible. C'est cette propriété qui sera d'abord utilisée dans la diode pour le redressement de courants alternatifs.

IV La triode

Une électrode supplémentaire en forme de spirale, la "grille", est placée autour de la cathode, c'est-à-dire entre la cathode et l'anode. Son rôle est de régler le débit des électrons qui circulent entre le filament et la plaque.



La plaque



Le filament est glissé dans la cathode



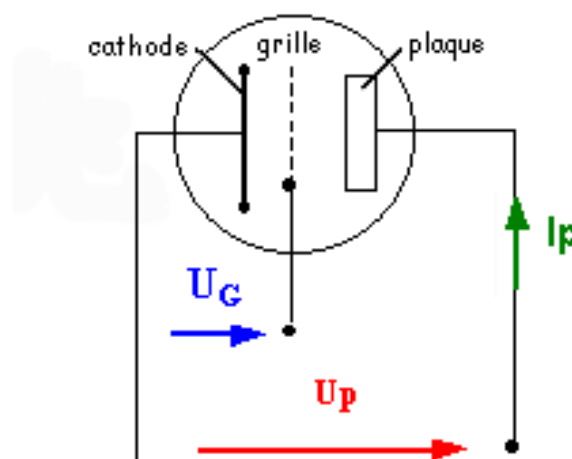
La grille

Le rôle principal de la triode est d'amplifier les tensions et les courants. Pour cela, la tension que l'on souhaite amplifier est appliquée entre la cathode et la grille. Selon la valeur de la tension appliquée (U_g), la grille repousse plus ou moins les électrons vers la cathode et règle ainsi la valeur du courant plaque (I_p).

Lorsque aucune tension n'est appliquée sur cette grille, tous les électrons émis par le filament rejoignent sans obstacle la plaque. On dit que l'on est au point de fonctionnement du tube.

En appliquant une tension négative sur la grille de contrôle, les électrons émis par la cathode sont freinés dans leur progression vers la plaque.

Dans son fonctionnement habituel, la triode n'est pas étudiée pour travailler avec une polarisation positive de la grille. Ce type de polarisation cependant utilisé en classe C et provoquant un courant de grille (que nous étudierons plus loin) produit un effet d'accélération des électrons, qui sont attirés par la plaque.



Le nombre d'électrons attirés par la plaque dépend en fait de la surface, de la forme, du pouvoir émissif et de la température de la cathode. Il dépend de la surface de la plaque, de la forme et des dispositions géométriques de celle-ci par rapport à la grille et à la cathode, mais aussi de la tension de polarisation négative de la grille, de la tension positive de la plaque, du pas de la grille (spirale ou échelle à spires, plus ou moins serrées) et enfin des rapports de distance cathode/grille, grille/plaque et cathode/plaque.

La tension amplifiée (U_a) peut être recueillie aux bornes d'une résistance (R) placée dans le circuit d'anode (un haut-parleur peut jouer le rôle de résistance).

Chaque petite variation de tension sur la grille va entraîner une grande variation du courant dans le circuit plaque, donc de la tension U_a : la triode a donc permis une amplification.

Par exemple si la résistance d'anode vaut 30 000 ohms et que la tension grille varie entre -0,1 et 0,1 Volts.

Lorsque la tension grille est nulle, le courant I_p équivaut au courant du générateur. Prenons par exemple un courant de 0,5 mA. C'est la valeur du courant lorsque les électrons traversent librement l'espace cathode-anode.

La loi d'ohm permet de calculer la tension aux bornes de la résistance : $U_a = R_a \times I_p$

$$U_a = 30\,000 \times 0,000\,50 = 15\text{ V}$$

Si la grille devient plus négative, elle a tendance à repousser davantage les électrons vers le filament. Le courant I_p diminue (0,45 mA) et la tension U_a diminue aussi:

$$U_a = 30\,000 \times 0,000\,45 = 13,5\text{ V.}$$

Quand la grille devient plus positive, elle a maintenant tendance à favoriser le passage des électrons. Le courant I_p augmente (0,55 mA) et la tension U_a augmente alors aussi:

$$U_a = 30\,000 \times 0,000\,55 = 16,5\text{ V.}$$

En résumé la tension U_g qui varie de 0,2 V provoque une variation de la tension U_a de $16,5 - 13,5 = 3\text{ V}$ et l'amplification est : $3 / 0,2 = 15$.

Au moment de la fabrication du tube, après que le vide ait été fait, les électrodes sont chauffées pour faire dégazer le métal et les molécules de gaz sont neutralisées par un revêtement brillant (le getter) vaporisé à l'intérieur de l'ampoule, généralement dans sa partie supérieure.

Les éventuelles molécules de gaz, heurtées par les électrons seraient transformées en ions positif, et perturberaient le fonctionnement du tube ce qui réduirait la durée de vie de la cathode qui les attire par son potentiel négatif.

De plus, la plaque subit un traitement de surface améliorant sa dissipation thermique lorsque les électrons viennent la frapper (voir plus loin "phénomène d'émission secondaire).

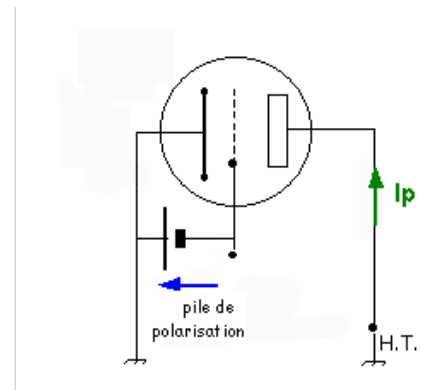
V Point de fonctionnement et distorsion

On a vu qu'une polarisation positive de la grille par rapport à la cathode ne semble pas idéale pour le bon fonctionnement de la triode. En effet, on s'arrange généralement pour que la grille conserve une polarisation négative (la cathode étant toujours prise comme référence), et ce quelque soit la tension à amplifier. Si la grille est polarisée positivement par rapport à la cathode, un certain nombre d'électrons libres (de polarisation négative) est, lors de leur passage à travers la grille de commande, captés par celle-ci (on dit que ces électrons ont créé un courant de grille). Dans ce cas, les électrons traversent difficilement la grille et en s'accumulant sur celle-ci, modifient la valeur de la tension à amplifier. De plus, les électrons absorbés par la grille manquent au courant I_p . Il est donc clair que la tension U_a amplifiée a subi une déformation ou distorsion.

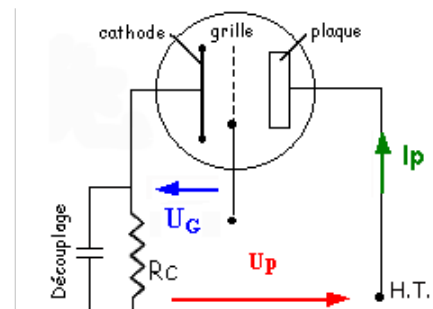
Pour éviter cela, plusieurs solutions se présentent:

On peut insérer une résistance de valeur appropriée entre la masse et la grille dans le but de créer une chute de tension grille proportionnelle à la valeur du courant de repos du tube électronique (valeur du courant lorsque aucun électron n'est freiné). Dans ce cas, la grille freinera plus ou moins le passage des électrons mais en restant toujours dans le domaine négatif. On dit que l'on a déplacé le point de fonctionnement de la lampe triode.

On peut placer en série avec la source de tension U_g une "pile de polarisation" de telle sorte que la tension de la grille soit toujours négative par rapport à la cathode. On ne place pas toujours la "pile de polarisation". On la rencontre seulement sur la lampe finale de certains récepteurs radio.



On peut ajouter entre la cathode et la masse une résistance dite "résistance de cathode". On place dans ce cas entre la grille et la masse une résistance d'assez forte valeur, dite "de fuite de grille". Le passage du courant dans le tube produit alors une tension continue positive sur la cathode, par rapport à la masse. La référence 0 Volt du tube étant la cathode (et non la masse), la tension de polarisation grille, vue par la cathode ne sera donc plus positive, mais négative. C'est ce que l'on appelle auto polarisation ou montage à cathode follower.



Le point de fonctionnement étant maintenant déterminé par le potentiel de la cathode, il est primordial que celui-ci ne fluctue pas. Or on retrouve dans le "circuit de cathode" les mêmes variations de potentiels que dans le "circuit de grille", c'est à dire une polarisation de cathode changeante. Pour remédier à cela, on dérive la composante alternative du courant vers la masse grâce à un condensateur de découplage.

Pour les amplificateurs, le seul domaine de fonctionnement intéressant est donc celui de la polarisation négative de grille. Dans ce cas, il ne circule aucun courant de grille, ce qui permet le pilotage du tube sans dépense d'énergie, c'est à dire uniquement par une tension.

VI Valeur de cut-off

En augmentant la valeur de la tension négative appliquée à la grille, le courant diminuera progressivement pour atteindre finalement l'état de blocage appelé "cut-off " du tube. La polarisation de la grille est alors telle, qu'aucun électron ne parvient à atteindre l'anode. Et le courant plaque (I_p) est nul.

VII Alimentation

A l'origine, tous les tubes électroniques étaient alimentés avec des piles car il n'y avait pas le secteur 220 V distribué dans les habitations comme aujourd'hui. Il fallait donc une pile pour alimenter le filament, une autre pour polariser la grille, et enfin une multitude de piles montées en série pour obtenir la tension de 200 à 250 V nécessaire à l'alimentation de la plaque. Plus tard, quand le courant a mieux été distribué, pour alimenter les lampes d'éclairage, on a pensé à redresser ce courant et le transformer en continu (en utilisant une diode). Le filament, lui, est généralement alimenté par 6,3 Volts.

VIII Précisions

A chaque électrode du tube correspond une broche (patte à la base du tube), qui viendra s'enficher dans une embase compatible intégrée au circuit électrique. Dans le cas des triodes les plus couramment utilisées dans les appareils audio, cinq broches sont utilisées: une pour la cathode, une pour la plaque, une pour la grille et deux pour le filament.

IX La double triode

Il s'agit simplement d'une ampoule dans laquelle sont insérées deux triodes séparées, de caractéristiques identiques, composées chacune d'une plaque, d'une grille, d'une cathode. Il n'y a cependant, à l'intérieur, qu'un seul filament commun aux deux cathodes.

Ces deux triodes pourront être polarisées différemment l'une de l'autre.

X La penthode

Dans le tube triode, il existe un effet d'émission secondaire. Une partie des électrons propulsés sur l'anode "rebondissent, de par leur vitesse, sur celle-ci. Ceci crée des variations de valeur de la tension de polarisation de la grille et perturbe le fonctionnement du tube.

On a d'abord tenté de rapprocher les électrodes entre elles mais ceci induit une capacité trop importante entre la plaque et la grille.

Dans la penthode, on a insérer entre la grille et la plaque deux autres électrodes: la grille écran et la grille de suppression. La grille écran est placée entre la grille de contrôle et la grille de suppression, et la grille de suppression est placée entre la grille écran et la plaque.

La grille écran (spiralée), raccordée à un potentiel positif, attire avec sa charge positive les électrons négatifs issus de la cathode, accélérant ainsi le flux électronique à travers la grille de contrôle (elle a aussi une fonction d'écran électrostatique entre la grille de contrôle et la plaque).

La grille de suppression, raccordée à un potentiel négatif, s'attache, elle, à diminuer la capacité résiduelle entre la grille et la plaque, et collecte les électrons rebondissant sur la plaque (émission secondaire) pour les véhiculer vers la masse.

Il existe également des tubes à quatre électrodes, appelés tétrodes, dans lesquels seule une grille-écran a été rajoutée. Mais la tétrode est peu utilisée dans le domaine de l'audio.

COMPARAISON OBJECTIVE DES LAMPES ET DES TRANSISTORS

Cette partie du mémoire consiste, à travers une analyse des caractéristiques du tube, en une étude approfondie de ce qui le différencie du transistor. Cette comparaison portera sur leur concept mais également sur les montages électriques qui leur correspondent.

Tout en énumérant ces divergences, nous nous demanderons si telle ou telle a un effet ou non sur la restitution du son.

Les points communs aux deux techniques se limitent, en effet, aux fonctions de chaque étage et à quelques tours de mains identiques comme le recours à la contre-réaction. Mais tout le reste est différent, qu'il s'agisse du mode de fonctionnement, de la notion de gain ou d'impédances.

Nous ferons la distinction entre les caractéristiques statiques et les caractéristiques dynamiques de ces deux composants.

Dans l'énoncé des caractéristiques statiques, on ne tient pas compte de l'impédance du circuit extérieur. Or, dans la pratique, en fonctionnement dynamique, ces impédances ne sont pas négligeables.

Rappelons rapidement que le fonctionnement d'un transistor repose sur celui de la diode mais que le transistor permet en plus d'amplifier un signal.

Le signal à amplifier entre par la base et module un courant (issu de l'alimentation) qui va de l'émetteur au collecteur. La base peut être assimilée à la grille du tube puisque c'est par elle que le signal à amplifier entre, l'émetteur à la cathode et le collecteur à la plaque.

La structure interne du transistor est un accollement ou jonction de deux blocs ou plus de polarisation différente. Le courant appliqué à la base modifie au rythme de l'audio les polarisations internes du transistor. C'est une diode, le transistor possède donc une tension de seuil au-dessous de laquelle aucun courant ne peut le traverser. Seule une polarisation de la base rend possible le passage d'électrons à travers le transistor qui se comporte comme une barrière de potentiel.

I Généralités

Un tube électronique amplifie des variations de tensions, c'est à dire qu'une petite variation de tension appliquée sur la grille entraîne une variation de courant plaque et donc de tension (aux bornes de la résistance d'anode).

Un transistor amplifie des variations de courant, c'est à dire qu'une petite variation de courant appliquée sur la base entraîne une grande variation de courant dans le collecteur. Ceci est dû à la nature chimique du transistor. Dans ce dernier, la modulation de commande correspond à une certaine quantité d'électrons amenée par la base qui modifie sa polarité interne. Il est donc bien question d'un courant d'électrons. Dans la lampe, la modulation s'effectue par des variations de potentiels uniquement. Il n'y a donc aucun courant présent dans le circuit de commande (sauf dans certaines conditions, voir plus loin "courant de grille").

II Courant de repos

Lorsque aucune tension n'est appliquée à la grille, les électrons se déplacent librement de la cathode vers l'anode: le courant "non modulé » traversant le tube est appelé courant de repos.

Il correspond donc au courant d'anode au point de fonctionnement, ou encore au courant délivré par le générateur. La valeur de celui-ci est de quelque milliampères.

Dans le transistor, le courant de repos (ou courant de saturation) correspond à l'absence de polarisation sur la base. Ce courant de repos est constant quelque soit la tension qui est appliquée au transistor (d'où le terme de saturation). Mais il n'est pas stable: le courant de repos augmente avec la température. Dans certains cas, cette augmentation en température fait croître le courant de repos (et ainsi de suite), entraînant la destruction du transistor. Sa valeur, beaucoup plus petite que dans le tube, se mesure en mA.

III Bruit de fond

L'origine première du bruit de fond d'une lampe est l'arrachement des électrons de la cathode sous l'effet du chauffage par le filament. Cette agitation électronique est un phénomène aléatoire, et si l'on considère le courant de repos (aucun signal n'est porté sur la grille), sa valeur n'est donc pas réellement continue, mais présente des variations.

Ce courant sera donc invulnérable au condensateur de découplage en sortie et viendra s'ajouter à l'audio amplifié.

Le bruit de fond de la triode amplificatrice est relativement important. On a tenté de le réduire à l'aide d'électrodes supplémentaires placées entre la grille et la plaque (principe de la tétrode et de la pentode). Le bruit de fond d'un transistor se révèle être nettement moins important que celui du tube (de 10 à 20 dB), sachant que l'on ne rencontre pas le problème d'arrachement des électrons présent dans la lampe.

La lampe est également sensible aux champs électromagnétiques. Si les électrons traversant l'espace cathode-anode subissent quelque action d'un champ électromagnétique extérieur, on conçoit que ceci perturbera la continuité de leur flux.

Dans les amplificateurs à lampes, il est préférable que le filament soit alimenté en courant continu. Une alimentation de celui-ci en courant alternatif pourrait induire une ronflette (principalement s'il s'agit de bas niveaux).

Un transformateur d'alimentation mal isolé peut également être une source de rayonnements et induire du bruit audible.

IV Coefficient d'amplification

Dans un tube donné, le coefficient d'amplification (noté K) est le rapport des variations de la tension grille appliquée à un instant donné et de la tension d'anode qui en dépend (c'est une caractéristique statique).

$$K = DU_g / DU_a$$

Les triodes courantes peuvent amplifier jusqu'à 100 fois.

Ce qui varie dans le calcul d'amplification d'un transistor est la nature des termes du rapport.

Nous avons vu précédemment que ce composant était commandé par un courant et non une tension. D'où:

$$K = DI_c / DI_b$$

V Résistance d'entrée

On peut définir la résistance d'entrée d'un tube électronique par le rapport entre la tension grille (signal à amplifier) et le courant grille. On admet donc aisément que cette résistance d'entrée est infiniment grande puisqu'il n'existe aucun courant de grille (du moins dans les conditions courantes d'utilisation).

Ce n'est pas le cas dans le transistor puisque la tension de base provoque un courant de base.

Il faut donc une certaine puissance pour commander le transistor. On constate, de plus, que la résistance d'entrée varie fortement avec le courant de collecteur.

VI Résistance interne et résistance de sortie

La résistance interne (que nous noterons Q) correspond au rapport des variations de la tension plaque et du courant plaque.

Si l'on fait varier la tension plaque d'une valeur DU_p , il s'en suit une variation DI_p du courant plaque. Ces deux valeurs sont liées par la relation:

$$Q = DU_p / DI_p$$

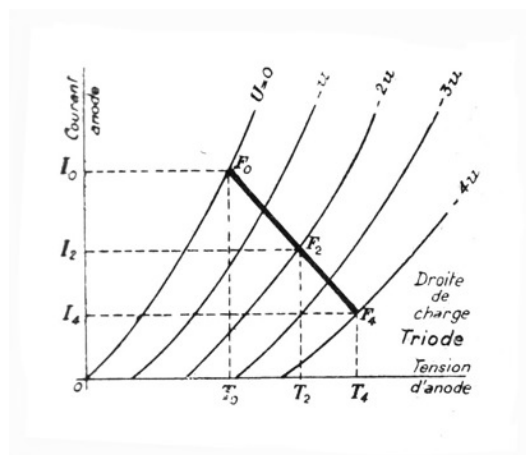
Q (en ohms) est la dérivée de U_p par rapport à I_p (voir plus loin "droite de charge») et Q est constante (dans la partie rectiligne de la courbe).

Il ne faut pas confondre cette résistance interne avec la résistance en courant continu de l'espace anode-cathode qui s'exprime, elle, par la relation U_p / I_p et n'est pas constante (elle dépend de la polarisation grille).

Dans un transistor, c'est la résistance de sortie qui correspond à la résistance interne d'un tube électronique. On préfère parler de résistance de sortie car le transistor possède plusieurs résistances internes (la résistance d'entrée en est une). La principale différence de la lampe est donc qu'elle possède une impédance d'entrée extrêmement plus importante que le transistor.

VII Droite de charge

La droite de charge est une caractéristique dynamique. Elle représente l'état électrique d'un tube amplificateur sur le réseau (appelé réseau de Kellog) des courbes caractéristiques tension anode/courant anode. Ces courbes correspondent chacune à des valeurs données de tension de polarisation de la grille ($U_g=0, -U_g, -2U_g, -3U_g$ et $-4U_g$).



La droite de charge de la triode correspond sur le schéma à la droite F0 F4. Théoriquement, les segments de droites F0-F2 et F2-F4 devraient être égaux. Ce n'est pas réellement le cas. On calcule généralement un rapport de 9 pour 11 entre ces deux segments de droite. Plus cette inégalité est importante, plus la distorsion sera importante. La pente de la droite de charge dépend de l'impédance du circuit d'anode. La qualité de l'amplification découle donc du choix d'une valeur correcte de cette impédance de charge (c'est-à-dire de la valeur de la résistance d'anode).

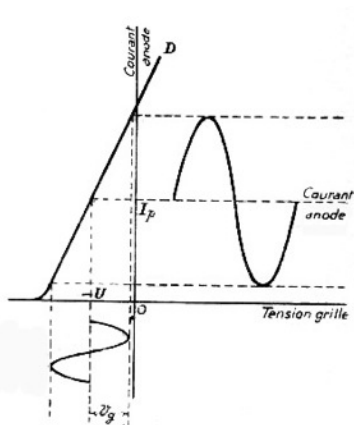
On peut noter que ces courbes caractéristiques ne sont pas linéaires.

En revanche, la même courbe, lorsqu'il s'agit d'un transistor, est particulièrement linéaire, et ce jusqu'à des potentiels de collecteurs presque nuls. Un transistor peut donc être « saturé » quand il reçoit un courant de base assez fort. La tension de collecteur devient alors pratiquement nulle et toute la tension d'alimentation apparaît comme chute de tension aux bornes de la résistance de charge, ce qu'on ne peut atteindre avec un tube électronique qui fait toujours apparaître une certaine « tension de déchet » (voir plus loin).

VIII Les classes d'amplification

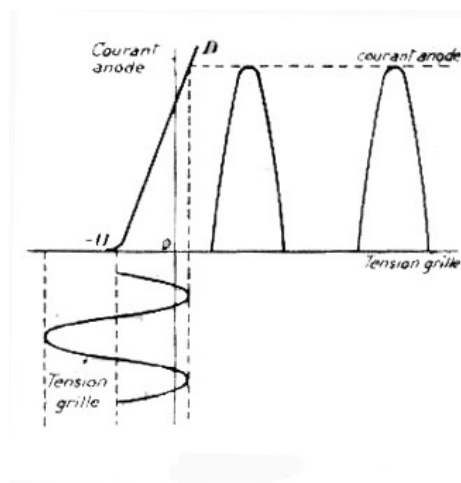
Il existe trois classes d'amplification dans l'utilisation d'un tube électronique: la classe A, la classe B et la classe C. Cette classification générale dépend des amplitudes de la tension de commande et du point de fonctionnement du tube.

Il existe néanmoins des classes d'amplification intermédiaires, appelées classes AB1 ou AB2.

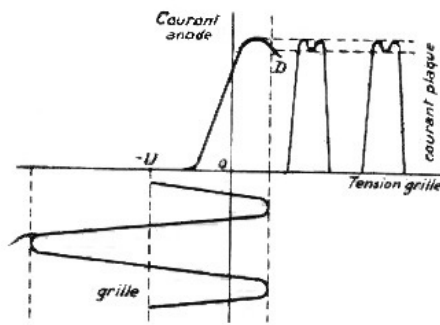


On dit que l'on est en **classe A** lorsque l'on polarise la lampe de façon à ce que le point de travail reste sur la partie rectiligne de la caractéristique dynamique. En classe A, la grille ne devient jamais positive.

Les amplificateurs de cette classe sont les plus couramment employés. C'est le montage amplificateur de classe A qui donnent la reproduction la plus fidèle et un minimum de distorsion.



La classe B s'obtient en faisant la polarisation négative de la grille - U_g égale à la polarisation de blocage pour la tension d'alimentation continue d'anode. En d'autres termes, pour être en classe B, le courant plaque doit être nul (ou voisin de zéro) en l'absence de tension alternative sur la grille de commande. En cours de fonctionnement, cette grille peut devenir positive. C'est-à-dire que le potentiel de la grille dépasse celui de la cathode. Les électrons sont captés par la grille de commande et on assiste donc à la naissance d'un courant de grille. Dans le fonctionnement en classe B, une seule alternance du signal de commande contribue à la formation du courant alternatif d'anode qui, de ce fait, est constitué par des demi-sinusoïdes (voir schéma). Il est donc clair qu'une lampe seule travaillant en classe B amène des déformations importantes, du fait de l'allure des variations du courant plaque. On compense cela par l'utilisation du push-pull : deux lampes travaillent en opposition de phase et reconstituent un signal complet en sortie (une alternance négative et une autre positive dans une période). Cette classe d'amplification permet d'obtenir une puissance très supérieure à celle d'une amplification en classe A.



En classe C, la polarisation de la grille au point de fonctionnement a une valeur au moins égale au double de la polarisation qui annule le courant plaque (soit le double de la polarisation nécessaire en classe B).

La grille de commande peut devenir très positive et absorber alors un certain nombre d'électrons. Aux instants où son potentiel est le plus positif, il se forme un creux au sommet des alternances du courant anodique de sortie (voir schéma).

Les amplificateurs HF travaillent généralement en classe C.

Afin de préciser que le courant grille n'apparaît à aucun moment (c'est-à-dire que la grille de commande ne devient jamais positive), on ajoute à la classe B le suffixe 1.

Il existe des tubes travaillant en classe A avec courant grille, soit en classe A2; Le suffixe 2, indique donc l'apparition du courant grille.

La classe AB est intermédiaire entre la classe A et B. De même, la classe BC est intermédiaire entre la classe B et C.

Notons la forme particulière de la caractéristique en classe C et de l'aspect du signal en sortie. Nous remarquons que celui-ci a subi une importante déformation qui se révèle être propre à l'amplification à lampe. Nous allons étudier plus en détail cette caractéristique dans le paragraphe qui suit.

XIV Pente ou transconductance

La pente (notée S) représente le rapport entre une variation de courant d'anode (I_p) et une variation de tension grille (U_g). C'est une caractéristique statique.

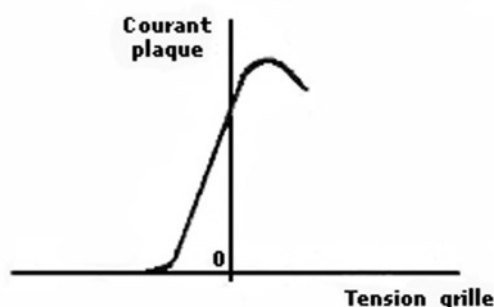
$$S = \Delta I_p / \Delta U_g$$

La pente se mesure en milli-ampères par volt (mA/V). Et si l'on fait le rapport K/Q, on obtient également le coefficient d'amplification (appelé conductance mutuelle ou transconductance et exprimé en micro-ohms).

Une variation de la tension de grille provoquera une variation du courant d'anode d'autant plus importante que la pente S sera plus forte. La pente définit en quelque sorte la mesure du gain du tube, ou encore « l'efficacité » de la commande par la grille.

Cette caractéristique est la fonction de transfert du tube puisqu'elle correspond finalement au signal de sortie en fonction du signal d'entrée.

Cette fonction de transfert n'est pas linéaire et présente des parties remarquables.



Lorsque l'on se déplace le long de cette caractéristique, on passe en fait de la classe A à la classe B, puis à la classe C. La classe déterminant la position du point de fonctionnement grille un signal de faible amplitude, le signal amplifié restera relativement fidèle au signal d'entrée.

On peut donc dire que la lampe sera plus délicate avec des petits signaux.

Le transistor, du fait de sa tension de seuil, sera, lui, plus brutal avec des signaux de faible amplitude (sauf en classe A).

Si maintenant, tout en conservant ce m'ême point de fonctionnement, on applique à la grille un signal de forte amplitude, on conçoit que les « crêtes » (négatives ou positives) de ce signal vont atteindre les parties non-linéaires de sa caractéristique.

Il est intéressant de noter que ces portions non-linéaires ne sont pas symétriques. En effet, lorsque le tube reçoit une alternance négative de grande amplitude, la valeur du courant plaque résultant va s'approcher de 0. Si cette amplitude augmente encore, on atteint ce que l'on appelle la valeur de cut-off (on dit que le tube est bloqué).

Pour ce qui est des alternances positives de forte amplitude, elle mettront en jeu la partie arrondie visible sur le haut de la courbe.

Intéressons nous de plus près à cette partie coudée.

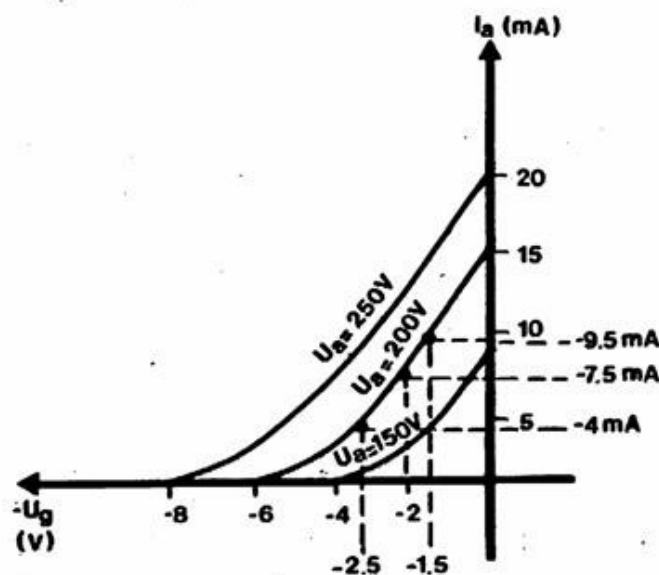
A partir d'un certain seuil, le signal de commande (tension grille) devient de moins en moins efficace. Puis la tension grille augmentant encore, le courant d'anode atteint son sommet et se met à diminuer.

Ceci est dû au fait qu'à partir du moment où le potentiel de la grille devient positif, celle-ci est capable de capter des électrons. Lorsque le signal à amplifier augmente, la grille capte de plus en plus d'électrons qui manqueront fatalement dans le circuit d'anode. D'une part, ce courant de grille modifie la valeur du courant plaque mais, d'autre part, il vient perturber le circuit de commande.

Le schéma ci-dessus, volontairement simplifié, fait apparaître l'aspect général de la caractéristique.

En réalité, la courbe est différente selon la valeur de haute tension appliquée à la plaque (tension d'alimentation). Il faut savoir qu'une tension plaque élevée permet d'obtenir des rendements intéressants, mais nécessitent des puissances d'excitation plus grande sur la grille.

Voici ci-dessous, un réseau de courbes plus complet (la partie de la courbe dans laquelle la grille est positive n'est pas représentée).



Pentes en fonction de la haute-tension

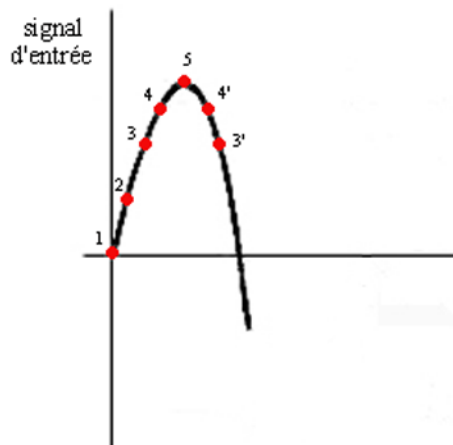
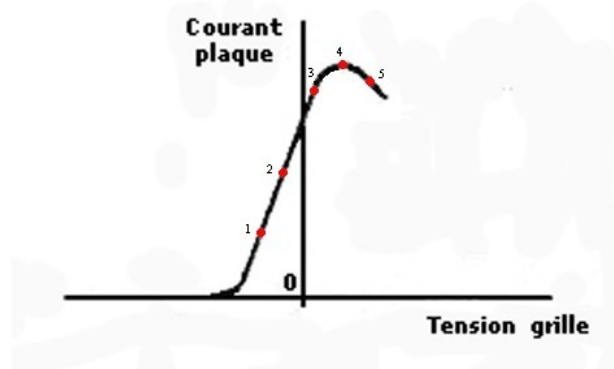
X Distorsion

Il faut faire la distinction entre la distorsion due à une modification du signal (émission secondaire ou contre-réaction par exemple) et la distorsion introduisant des fréquences audibles.

Nous allons nous intéresser maintenant à ce deuxième cas de figure. On parlera de distorsion harmonique qui est présente, de manière plus ou moins importante (taux de distorsion harmonique), dans n'importe quel appareil audio.

La distorsion dans la lampe est présente quelque soit la valeur du signal de commande. Mais elle augmente considérablement lorsque l'on entre en saturation. On a vu précédemment que pour des valeurs de tension grille élevées, la fonction de transfert à une forme remarquable.

Nous allons tenter d'interpréter cette fonction avec un signal simple, un sinus, dont nous étudierons uniquement la première demi-alternance de son cycle complet (ou période).



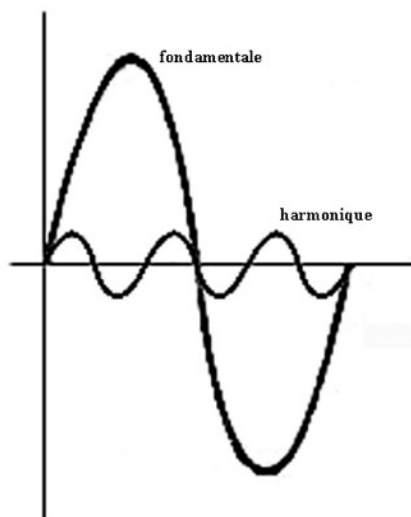
La théorie de Fourier permet de traduire mathématiquement les phénomènes vibratoires tels que l'émission du son. Cette théorie établit qu'un signal périodique complexe (audio quelconque) peut être décomposé en une somme de sinus (correspondant chacun à des sons purs) et ayant entre eux un rapport de fréquence, d'amplitude et de phase.

La fondamentale d'un son correspond au sinus dont la fréquence est la plus basse et dont l'amplitude est la plus grande. Une fréquence harmonique correspond à un sinus de fréquence plus élevée que la fréquence de la fondamentale et d'amplitude moindre.

L'expression complète de la formule mathématique de Fourier fait également intervenir un cosinus. Mais dans une interprétation « audio », on admet qu'un cosinus n'est autre qu'un sinus ayant subi un déphasage (de 90° ou $\pi/2$).

On dit qu'une harmonique est impaire lorsque son sinus « figuratif » à une fréquence dans un rapport impaire avec la fondamentale. On dit qu'un harmonique est paire quand ce rapport est paire. Ce rapport est plus communément appelé rang. On note par convention le rang 1 pour la fondamentale, le rang 2 pour la première harmonique paire, le rang 3 pour la première harmonique impaire, etc...

Tentons de déterminer la nature des harmoniques qui apparaissent lors de la saturation de la lampe. Sommons une fonction sinusoïdale (assimilée au signal d'entrée) et une fonction sinusoïdale de fréquence triple.



On s'aperçoit que la fonction résultante de cette sommation correspond à la courbe du signal de sortie du tube. On peut donc en conclure que, lorsque le tube travaille dans cette zone coudée de la caractéristique, il apparaît une fréquence harmonique impaire dans le signal.

Par exemple, prenons comme note fondamentale le LA3 à 440 Hz. Sa fréquence harmonique 3 correspond à une note de fréquence $440 \times 3 = 1320$ Hz, soit la note Mi 5. Lorsque ces deux fréquences sont émises en m'me temps, on entend finalement un accord de deux notes ayant comme intervalle une quinte (si l'on rapporte les deux notes à la m'me octave).

S'il convient de dire que la saturation de la lampe ajoute des fréquences harmoniques impaires au son d'origine, il faut être conscient que des harmoniques paires et non-entières sont ajoutées également mais en proportion moindre.

De plus, la saturation que subit l'alternance négative du signal n'est pas de la même nature, puisque la caractéristique de transfert du tube électronique n'est pas symétrique (par rapport au point de fonctionnement). Lors de la saturation, l'alternance positive se verra distordue (comme illustré ci-dessus) engendrant un ajout d'harmoniques, alors que l'alternance négative subit plutôt une compression.

La saturation du transistor (contrairement à la lampe) se rapproche plus d'un écrêtage.

On peut donc dire qu'il existe une réelle différence entre les deux modes d'amplification si l'on admet qu'un son ajouté de sa quinte paraîtra nettement différent d'un même son ajouté de son octave. On ne fait, ici, pas entrer en jeu tout autres phénomènes comme la compression (voir contre-réaction) et autres.

Il faut noter également le comportement des deux types d'amplificateurs avec des signaux de faibles amplitudes.

L'amplification de signaux de faible amplitude par un tube ne subira en aucun cas une distorsion, puisque l'on se trouve, dans ce cas, proche du point de fonctionnement, c'est à dire dans une partie linéaire de la caractéristique.

Prenons le même signal mais amplifié cette fois-ci par un transistor. On verra apparaître une distorsion de croisement pour les signaux audio de petite amplitude (sauf dans les amplificateurs à transistors de classe A) et ce dû à l'existence d'une tension de seuil propre au transistor.

On tolérera pour un amplificateur à tube jusqu'à 2 % de distorsion, contre seulement 0,5% pour un amplificateur à transistors, valeurs encore difficilement décelables par l'oreille humaine.

Il est évident que l'on ne fait pas constamment saturer un amplificateur (amplificateurs de guitare mis à part). Mais c'est dans la partie proche de la saturation que l'utilisation de la lampe devient intéressante.

XI Contre-réaction

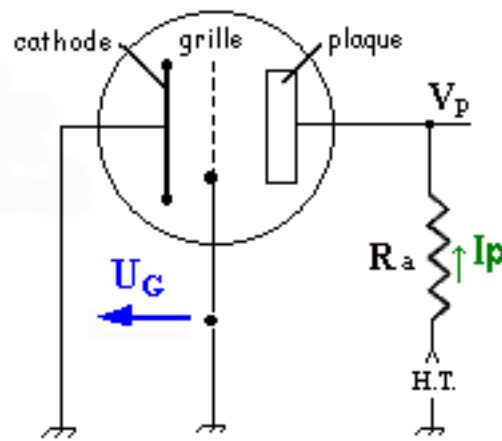
Nous avons étudié jusqu'ici les influences de la tension et du courant sur le circuit de sortie.

Mais il existe également une réaction en sens inverse appelée contre-réaction. Ce phénomène, par définition, tend à s'opposer à la cause qui lui a donné naissance.

Il faut savoir que la présence d'une contre-réaction dans le transistor est un phénomène interne au composant. Il n'en n'est pas de même dans un montage à lampe car les contre-réactions dans celui-ci proviennent des corrélations « inter-composants » et « inter-potentiels », et non de par la nature même de la lampe. Un tube électronique seul ne peut en aucun cas être responsable d'une contre-réaction. On est donc capable, dans un montage à tube électronique de gérer leurs effets et de s'en servir.

Il existe une contre-réaction dans le montage à lampe que l'on rencontre dans tous les cas.

On sait que les variations de polarisation de la grille de commande engendrent une variation du courant d'électrons dans le tube, qui à son tour, fait varier la tension plaque par l'intermédiaire de la résistance de charge. Mais on sait également que le potentiel de la plaque détermine la quantité d'électrons traversant le tube.



Il ne faut pas confondre la tension d'alimentation (haute tension notée H.T.) et le potentiel de plaque (noté V_p sur le schéma ci-dessus). Leur valeurs sont d'ailleurs différentes. On peut mesurer aux bornes de la résistance d'anode (R_a) une chute de potentiel égale à $R_a \times I_p$ (d'après la loi d'Ohms). La valeur de V_p vaut donc la haute tension moins la chute de potentiel.

Lorsque la tension grille augmente, la quantité d'électrons atteignant (en un temps donné) la plaque augmente, donc le courant I_p augmente. Pour une m'me valeur de résistance, si le courant I_p augmente, alors la chute de potentiel aux bornes de la résistance d'anode deviendra plus importante et V_p diminuera (pour une valeur de haute tension constante).

Or une plaque ayant un potentiel moindre attire moins d'électrons, ce qui va à l'encontre de l'augmentation de la tension grille.

Il existe une autre forme de contre-réaction, mais dans le cas d'un montage à cathode follower uniquement (voir schéma plus haut).

Lorsque la tension de commande augmente, le courant de plaque augmente également, et le potentiel plaque diminue. La différence de potentiel entre la grille et la cathode va donc augmenter, ce qui va engendrer une réduction du courant plaque.

Remarque: On a démontré précédemment que le potentiel de la plaque diminuait lorsque la tension de grille augmentait. On peut donc en conclure que l'amplification d'un signal audio (alternatif) se fait avec inversion de phase, une alternance positive en entrée correspondant à une alternance négative en sortie.

Dans un montage à transistor, la tension de base varie légèrement quand on augmente la tension de collecteur. Cela nous permet de supposer qu'il existe une troisième résistance interne du transistor, située entre la base et le collecteur. L'effet de cette contre-réaction sera d'autant plus sensible que le gain en amplification sera plus grand. Or, ce gain dépend essentiellement de la résistance de charge. L'influence de la contre-réaction devient quasiment négligeable quand la résistance de charge est faible par rapport à la résistance interne.

On peut prévoir qu'une contre-réaction présente dans un montage amplificateur va appliquer une compression au signal. Il ne faut pas confondre cette compression avec la compression directement liée à une saturation de la lampe (voir sa fonction de transfert), m'me si les deux phénomènes sont liés.

Dans la conception d'un amplificateur de puissance à lampes, la contre-réaction est très utile. Elle permet dans certains cas de linéariser la courbe de réponse de l'amplificateur, et de compenser différents défauts.

XII Autres phénomènes

On s'aperçoit qu'un montage à lampe modifie l'enveloppe du son qui le traverse et ce par contre-réaction. Directement lié à la bande passante, le temps de montée (de 1 à 25V/microseconde) est déterminant pour la réponse transitoire. Les transformateurs d'entrée ainsi que certains étages à lampe réduisent le temps de montée, ce qui est susceptible de réduire l'attaque du son.

XIII Effet capacitif

La surface équivalente vue du filament ou de la plaque produit un effet capacitif inter-électrodes: il existe une capacité cathode/grille, grille/plaque et cathode/plaque. Ces effets capacitifs influent sur le coefficient d'amplification, mais de manière peu notable car ils sont relativement faibles. Ils ne sont cependant pas négligeables dans le cas d'un transistor.

XIV Linéarité en fréquence

On a coutume de dire que la lampe colore le son qu'elle amplifie, or on entend par coloration que toutes les fréquences ne sont pas restituées avec la m'me amplitude. Ce n'est pas le cas. La lampe en elle-m'me est assez linéaire. La non-linéarité de la réponse d'une lampe ne peut être due qu'aux composants (condensateur, résistance,...) qui complètent le montage et aux interactions internes au circuit. Un condensateur de découplage (voir "Mise en pratique ») par exemple, si sa valeur de capacité est mal choisie ou si celui si à subit l'épreuve du temps, peut filtrer le signal (coupe-bas).

XV Le transformateur de sortie

Dans un amplificateur à tube, le transformateur de sortie à un effet considérable sur la qualité du son restitué. Il doit adapter l'impédance de sortie de l'étage d'amplification à l'impédance du haut-parleur. Le rapport de transformation (rapport entre le nombre de spires du secondaire et du primaire) doit donc être choisis en connaissance de cause. Si l'on branche sur le secondaire d'un transformateur de sortie, un haut parleur d'impédance inappropriée, le tube sera, par l'intermédiaire du primaire, incorrectement chargé et générera des distorsions.

XVI Les amplificateurs de guitare

Contrairement aux transistors, les tubes sont sensibles aux bruits ambiants. Leurs éléments internes (grille, anode, cathode) sont mis en vibration par le son émanant du HP, qui se trouve proche de l'ampli. Ceci produit des effets qui peuvent aller d'une réverbération agréable à un effet larsen épouvantable. La lampe est appréciée des guitaristes, principalement lorsqu'ils jouent des sons saturés. On profite alors de sa saturation particulière.

MISE EN PRATIQUE

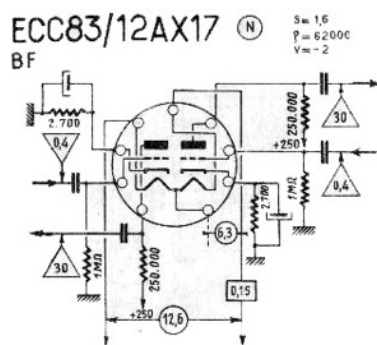
I Présentation

Dans le prolongement de cette analyse très technique du principe de l'amplification à lampe, nous allons tenter d'écouter ses traits caractéristiques. Le rôle premier de l'appareil, conçu pour l'occasion, n'est pas d'amplifier (bien qu'il en soit capable) mais de mettre en évidence "l'effet lampe » (analogique).

L'idée est de traverser, avec un signal audio, un tube électronique et ce, tout en étant à m'ême de faire varier nombre de paramètres tels que la tension d'entrée et de sortie, le point de fonctionnement, la valeur de haute tension, etc...(un paragraphe entier y est consacré).

Dans ce chapitre sera retracé les différentes étapes de la conception et de la fabrication de l'appareil, les problèmes rencontrés et son mode d'utilisation. Il sera expliqué le choix des composants présents dans le circuits et l'agencement de ceux-ci.

Le circuit électrique est composé d'une alimentation (détaillée plus loin) et du montage standard d'un étage d'amplification à lampe, excepté que les paramètres électriques du tubes sont réglables et visualisables par des voltmètres et ampèremètres. Le montage en question est à cathode follower (voir chapitre précédent) et fonctionne avec une double triode ECC 83 (on utilisera une seule triode sur les deux).



Les paramètres modifiables de l'appareil sont:

- Le niveau d'entrée (visualisable par un galvanomètre gradué).
- Le niveau de sortie (visualisable par un galvanomètre gradué).
- Le chauffage du filament (résistance variable).
- La valeur haute tension du tube (visualisable par un galvanomètre gradué).
- La valeur du courant plaque (visualisable par un milli ampèremètre).
- La valeur de la résistance de charge.
- La polarisation grille (visualisable par un galvanomètre gradué)
- Le découplage cathode (on/off).
- La valeur de la résistance de grille.

L'appareil possède également un by-pass général permettant de détecter plus facilement les influence de l'étage à lampe.

II Alimentation.

L'appareil se branche sur le 220V secteur. Son alimentation est composée d'un transformateur (élevateur de tension), d'un pont de diodes et d'un filtre composé d'une bobine et de deux condensateurs.

Le transformateur est constitué de plusieurs ensembles de bobinages. Une partie est destinée à transformer la tension du secteur, et une autre partie à alimenter le circuit de chauffage du filament. La tension de 220 Volts efficace délivrée par EDF est élevée à 364 Volts efficace (soit 515 Volts cr'te) puis redressée par le pont de diodes (cr'te à 500 Volts environ après redressement). Le filtre atténue enfin légèrement la tension jusqu'à 494 Volts cr'te continu.

L'alimentation du filament issue de ce m'me transformateur est de 6,9 Volts en sortie de transformateur et peut 'tre atténué à 6.28V, 6V, 5.45V et 4,77V (rotateur de chauffage du filament).

Composants utilisés: - Un transformateur

- Deux condensateurs de capacité 150 mFarads, 400 Volts en tension de claquage (condensateurs bleus).
- Un bobinage de transformateur servant de self.
- Un pont de diodes.

III Circuit de cathode

Le découplage cathode nécessaire dans le montage à cathode follower est assuré par un condensateur de 47 mF pour 10 Volts. Celui-ci peut être activé ou non par l'interrupteur de découplage cathode (voir schéma).

La grille de commande étant reliée à la masse du circuit, la valeur de polarisation correspondant au point de fonctionnement du tube est déterminé par le potentiel de la cathode. La résistance variable (R2) placée entre la cathode et la masse permet un déplacement du point de fonctionnement.

Le "circuit de cathode » est complété par un voltmètre permettant de visualiser la polarisation de la cathode par rapport à la grille équivalant le point de fonctionnement. La résistance (R1) placée en série avec le voltmètre permet d'adapter la mesure à l'échelle de celui-ci.

IV Circuit de grille.

La grille est reliée à la masse par l'intermédiaire d'une résistance de 1 Mégohms. Cette résistance permet d'envoyer les électrons susceptibles d'être captés par la grille (courant de grille) vers la masse.

Le signal en entrée traverse un condensateur de découplage (0,25 mF) assurant l'immunité au courant continu. Sa valeur de capacité est suffisante pour assurer la linéarité en fréquence du signal de commande.

Remarque: Lorsque l'on lit la tension grille au voltmètre, on relève en réalité la valeur du potentiel de cathode. Dans le montage à cathode follower, la grille étant reliée à la masse, le potentiel de cathode correspond, en valeur absolue, à la tension de grille. Le voltmètre mesure la tension cathode par rapport à la masse : Le voltmètre placé entre la cathode et la grille aurait perturber le fonctionnement de par sa résistance trop faible.

V Circuit d'anode et haute tension

Un voltmètre placé entre la plaque et la masse permet de relever le potentiel de la plaque (ou tension plaque).

Un milli ampèremètre, branché en série, indique la valeur de courant anode.

Une résistance variable permet de faire varier le niveau de sortie de l'appareil (visualisable par un voltmètre). Celle-ci est précédée par un condensateur de découplage (0,05 mF) qui interdit le passage du courant continu issu de l'alimentation. Son influence sur les fréquences de la bande audible n'est pas négligeable.

On sait qu'un condensateur présente une résistance (ou réactance) d'autant plus forte que la fréquence du signal qui le traverse est basse.

Dans notre montage, il se trouve que ce condensateur de 0,05 mF atténue de 14 % une fréquence de 20 Hz (après mesures).

Rapporté à une échelle en décibels cela correspond à:

$$20 \log (14/100) = -17 \text{ dB (à 20 Hz)}$$

Pour éviter cette non-linéarité, il faudrait utiliser un condensateur de capacité supérieure.

La haute tension est variable par un rotateur (schématisé par une unique résistance variable). Cette résistance étant en parallèle avec un condensateur (C4), affectera uniquement le courant continu de l'alimentation.

La résistance R6 est la résistance de charge du circuit. Elle régit le courant plaque et par voie de conséquence la tension plaque.

VI Entrées/sorties

Deux embases RCA femelle permettent d'entrer un signal audio (mono). L'une dispose un réglage de niveau par résistance variable (R8), l'autre attaque directement le condensateur d'entrée (C2) et la grille du tube. Un voltmètre permet de visualiser le niveau du signal entrant dans l'une ou dans l'autre.

Les deux sorties, sur embase RCA femelle également sont strictement identiques (dans la pratique, l'une permet l'écoute et l'autre la mesure). Un voltmètre permet la visualisation du niveau de ces sorties (et jamais le signal d'entrée lors d'un by-pass).

Les voltmètres d'entrée et de sorties étant des galvanomètres, ceux-ci sont en série avec une diode permettant de visualiser une amplitude.

VII Guide d'utilisation

A l'allumage de l'appareil (pas de signal audio en entrée), il faut entre dix et quinze secondes pour voir apparaître un courant plaque, temps pendant lequel le filament monte en température et commence à laisser échapper des électrons.

On s'aperçoit que la tension plaque augmente progressivement jusqu'à la valeur de fonctionnement. Le phénomène n'est pas instantané du fait de la présence des condensateurs de filtrage de l'alimentation.

Lorsque les premiers électrons s'échappent de la cathode, on peut voir augmenter le courant plaque. Ceci à pour effet direct de faire chuter la tension plaque (comme expliqué dans le chapitre consacré à la contre-réaction), les valeurs de la haute tension et la résistance de charge étant constantes.

Notons également que durant cette phase de "mise en route », lorsque la tension plaque diminue, la tension grille diminue aussi, ce qui dénote de la contre réaction importante qui existe dans le montage à cathode follower (expliqué dans le chapitre précédent).

Augmenter la température de chauffage du filament fait croître, logiquement, la valeur du courant plaque. La valeur de tension à appliquée au filament, et donnée par le constructeur, est de 6,3 Volts.

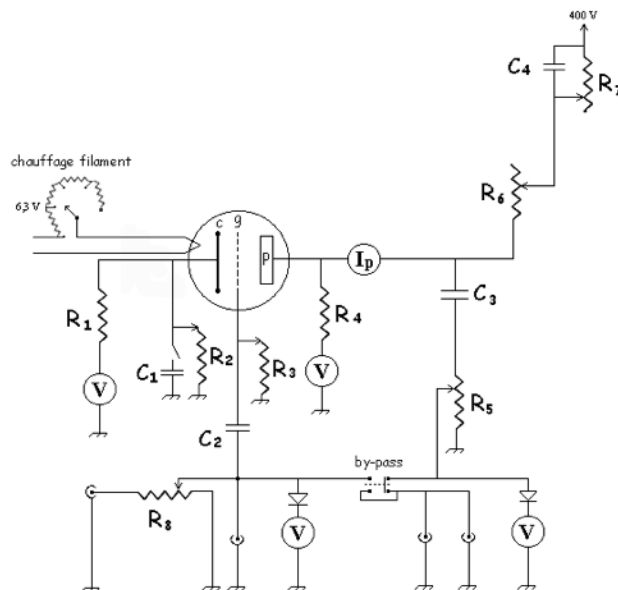
Il n'y a toujours aucun signal audio appliqué en entrée de l'appareil.

En augmentant la haute tension,

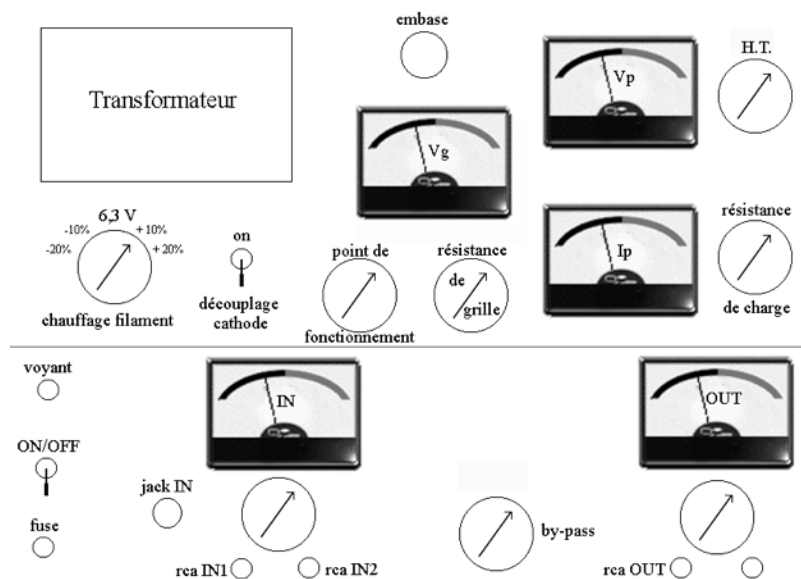
on élève la tension plaque

on élève le courant plaque, puisque une plaque à un potentiel plus élevé attire une quantité plus importante d'électrons (en un temps donné).

le point de fonctionnement se déplace (il descend le long de la caractéristique de transfert).



- | | |
|----------------------------------|----------------------------------|
| R_1 : résistance d'adaptation | c : cathode |
| R_2 : point de fonctionnement | g : grille |
| R_3 : résistance de grille | p : plaque |
| R_4 : résistance d'adaptation | C_1 : découplage cathode |
| R_5 : résistance de sortie | C_2 : découplage entrée |
| R_6 : résistance de charge | C_3 : découplage sortie |
| R_7 : résistance haute tension | C_4 : résistance de découplage |
| R_8 : résistance d'entrée | V : voltmètre |
| I_p : milliampèremètre | ∇ : diode |
| ⊕ : embase RCA | $\sim$: résistance variable |



VIII Mesures et tests

Les résultats suivants correspondent à des mesures faites en l'absence de signal audio. Elles rendent compte des caractéristiques intrinsèques de l'appareil.

Impédance d'entrée : 10 KW
 Niveau d'entrée : 0,4 Volts
 Haute tension : 250 Volts
 Courant d'anode au point de fonctionnement : 1,2 mA
 Pente : 1,6 mA/Volts
 Alimentation : 220 Volts ~
 Réponse en fréquences : 10 Hz - 30 KHz

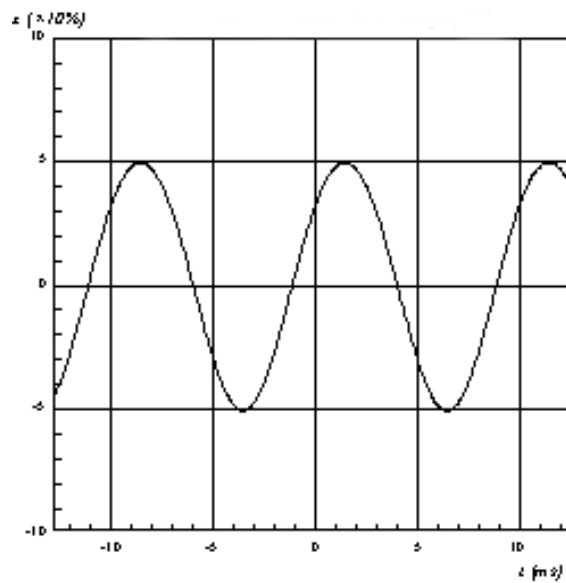
La plupart de ces caractéristiques correspondent aux spécifications du tube lui-m'ême (haute tension, courant d'anode, pente) pour un fonctionnement normal.

On ne peut établir une impédance de sortie puisque l'on ne recueille pas de courant en sortie mais seulement une différence de potentiel (tension).

Une autre série de test a été réalisé sur le signal audio, entrant et sortant, permettant ainsi une comparaison. J'ai utiliser pour cela un oscilloscope (programme informatique) et un CD sur lequel sont enregistrés successivement des fréquences (100, 440, 1000, 10000 et 20000 Hz), des bruits blanc et rose, et différents programmes musicaux (batterie, guitare, piano, basse et voie seuls).

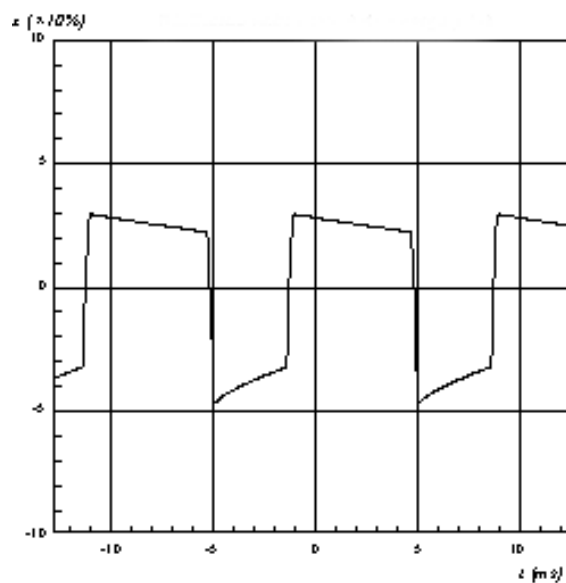
La caractéristique de transfert de l'ECC83 nous révèle que si l'on travaille avec un point de fonctionnement à -2 Volts (préconisé par le constructeur) on se trouve au centre de la caractéristique de transfert du tube. Par lecture du graphique, on peut déduire qu'il faut entrer un signal ayant pour valeur de cr'te 2 Volts (au moins) pour profiter des parties non-linéaires de la courbe.

Voici la forme d'onde d'un signal de 100 Hz en sortie de l'appareil entrant avec une tension de 0,4 Volts.



La forme du signal est logiquement sans déformation puisque 0,4 Volts est la tension d'entrée recommandée par le constructeur du tube pour un fonctionnement optimal.

Voici ci-dessous, pour la m'me fréquence de 100 Hz, le signal en sortie lorsqu'il entre avec un niveau de 12 Volts.

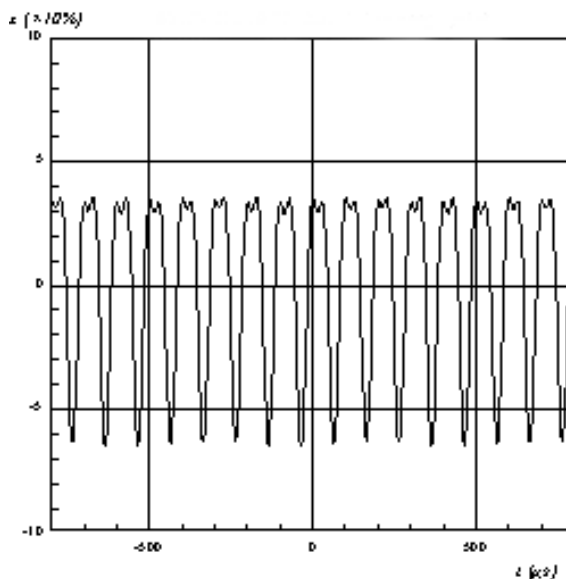


Dans cette expérience, les différents condensateurs présents dans le circuit sont suspectés. En effet, si leur temps de charge (égal au produit de leur résistance par leur capacité) est supérieur à la période du signal (inverse de la fréquence), il est possible que la distorsion du signal ne soit pas uniquement issue de la lampe. Lors du test, les voltmètres d'entrée et de sortie ont été débranchés, par sécurité, des tensions allant jusqu'à 12 Volts traversant l'appareil.

Voici maintenant la distorsion d'un signal d'une fréquence de 10 KHz entrant sous une tension de 10 Volts. On visualiser aisément la forme particulière de l'onde sur son alternance positive.

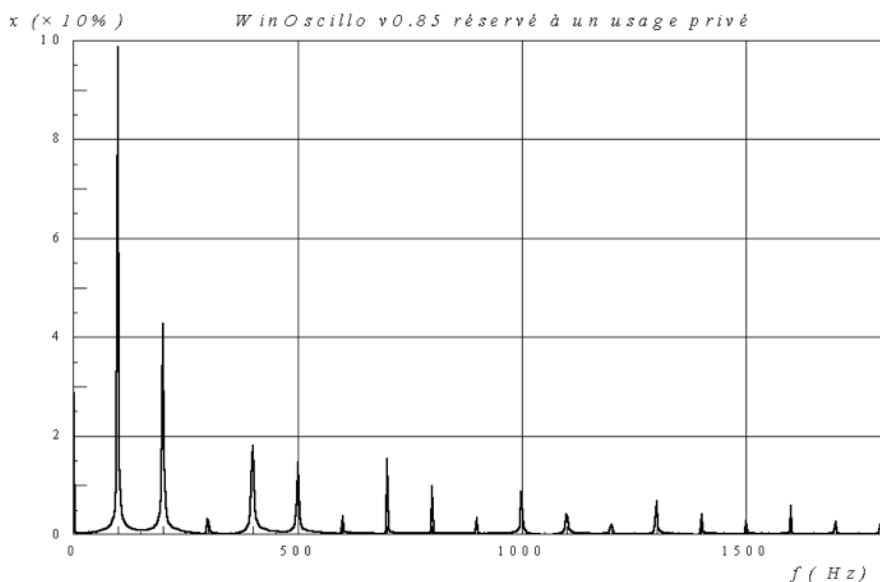
Au fil des mesures, il se trouve que la partie creusée au sommet de l'alternance positive du signal n'apparue que pour des valeurs de fréquences supérieures à 10 KHz. Pour des fréquences inférieures à cette valeur, il résulte de la saturation une onde s'apparentant d'avantage à une onde carrée.

Deux phénomènes inexpliqués ont été constatés. D'une part, et toujours pour des hautes fréquences, on ne parvient dans aucun cas à générer une distorsion pour les alternances positives du signal. D'autre part, si l'on fait croître jusqu'à 17 Volts la tension d'entrée, les « creux » disparaissent totalement.

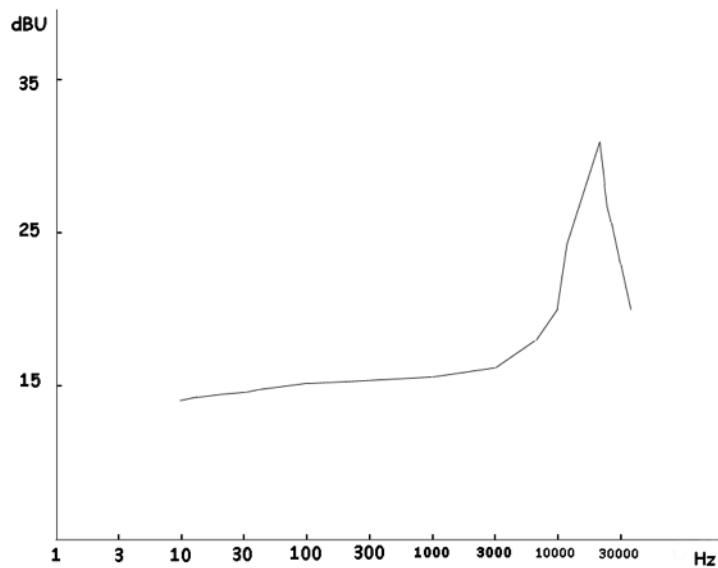


Intéressons nous maintenant à l'aspect fréquentiel de la distorsion. Le signal utilisé pour cela à une fréquence de 100 Hz et son niveau est de 12 Volts.

L'interprétation des résultats obtenus s'avère délicate. Il est clair qu'un tube électronique qui entre en distorsion ne contribue pas seulement à l'ajout d'harmoniques impaires. Des fréquences harmoniques paires sont également générée.



On peut constater qu'il se reproduit un cycle, toutes les trois harmoniques entières, constitué d'une fréquence harmonique d'amplitude relativement importance puis de deux harmoniques (paire et impaire suivantes) d'amplitude décroissante l'une par rapport à l'autre.



Courbe de réponse de l'appareil

La non-linéarité de la courbe de réponse dans les hautes fréquences peut s'expliquer par la présence des condensateurs et de la bobine de filtrage appartenant à l'alimentation, ainsi que du condensateur de découplage placé dans le circuit de haute tension. Ces différents composants sont en effet susceptibles de créer un circuit résonant (la courbe est un ensemble de segments obliques car dessinée à partir de relevées numériques relativement espacées).

IX Difficultés et problèmes

- La présence des appareil de mesure a généralement été problématique, introduisant des charges supplémentaires dans le circuit.
- L'étalonnage théorique des VU-mètres d'entrée et de sortie, s'avérant difficile à mettre en oeuvre (du fait des résistances des diodes), a été fait expérimentalement à l'aide d'un voltmètre de mesure.
- Dans un premier temps, la valeur de résistance du potentiomètre de sortie choisie était de 10 KW, trop faible comparée aux valeurs de charge (entre 47 KW et 517 KW). Celle-ci a été remplacée par la suite par un potentiomètre de 1 MW. La variation du gain de l'amplificateur en fonction de la valeur de la résistance de charge a alors pu être observée.

CONCLUSION

La chaleur de la lampe ne vient donc pas des quelques 900° C émis par le filament!

Tout comme le débat « analogique-numérique », celui opposant la lampe et le transistor dure depuis longtemps, et durera certainement encore. Si l'on ne peut guère exprimer un avis subjectif sur la question, il est nécessaire de comprendre un minimum le fonctionnement propre de chacun de ces composants. C'est fatalement en se plongeant dans des considérations purement techniques que l'on peut trouver une réponse.

Ce qui a le plus retenu mon attention dans l'étude du tube est la distorsion asymétrique qu'il fait naître lorsqu'il sature. Voici une, voire la plus grande différence qu'il présente par rapport au transistor. Par ailleurs, la formule énonçant que la lampe induit des fréquences harmoniques impaires et le transistor des fréquences harmoniques paires, doit être employée avec précaution.

Les phénomènes internes au circuit électrique à lampe sont loin d'être simples à cerner et je ne prétends pas être parvenu à tous les éclaircir. Ceux-ci semblent généralement différés en fonction de la fréquence et du niveau du signal qui est appliqué à l'entrée d'un étage d'amplification.

Le plus dur est de se rendre compte que le succès de la mise en pratique est bien loin d'être aussi évident qu'il ne l'a été au terme de l'étude purement théorique du principe de la lampe.

Il ne faut pas mettre à part les caractéristiques des appareils de mesures utilisés, et notamment de l'oscilloscope, dont l'entrée n'est autre que la carte son d'un ordinateur! L'acquisition du signal par celui-ci fait en effet intervenir une conversion "analogique vers numérique" à une fréquence d'échantillonnage donnée, ce qui est susceptible de perturber les mesures et donc les interprétations.

L'élaboration de ce mémoire ainsi que la conception de l'appareil qui le complète m'aura finalement permis d'approfondir l'étude des circuits électriques et de prendre conscience des contraintes inhérentes à l'élaboration d'un matériel audio.