

A propos des tubes de puissance à grille

Matthieu CABELLIC
F4BUC - f4buc@orange.fr

Tout au long de cette discussion, nous nous intéresserons d'avantage à la physique interne des tubes plutôt qu'à leur régime de fonctionnement dans un amplificateur. Sur ce dernier point la littérature amateur est suffisamment bien fournie.

Contrairement à un amplificateur à transistor, un amplificateur à tube nécessite des soins particuliers au cours de sa vie et pour cela il est nécessaire de comprendre la physique et la technologie des tubes.

Apprendre les sources de faiblesse d'un tube c'est aussi apprendre à en prendre soin mais aussi à mieux les utiliser.

La technique des tubes électroniques n'est pas une science exacte, loin de là. C'est un domaine extrêmement complet à très forte composante technologique relatif à la science des matériaux, à l'électrostatique et à l'électrodynamique mais également l'électromagnétisme (surtout pour les TOP). La réalisation d'un tube est un domaine industriel très difficile, et même si pour certains elle peut renvoyer à des images « anciennes », c'est encore toujours à l'heure actuelle une industrie de pointe à très forte valeur ajoutée ou l'expertise technique est fondamentale et ou la connaissance de l'expert est tout aussi incontournable que le « tour de main » du technicien.

- Pourquoi est il toujours difficile de se documenter sérieusement sur les tubes ?
- Pourquoi deux tubes portant la même référence n'ont pas les mêmes caractéristiques / performances ?
- Pourquoi chacun nourrit-il sa petite « recette » personnelle quand au conditionnement des tubes ?

Par rapport à ces aspects un peu mystérieux des tubes, il me semble qu'il y a une carence dans la littérature amateur et c'est ce qui m'a poussé à rédiger ce mémoire technique, qui, je l'espère vous apprendra certaines choses.

1.1 La cathode

Nous le répétons souvent, la cathode est le cœur d'un tube.

Les tubes de puissance à grille exploitent le processus d'émission thermoïonique. Dans un tube, le dispositif émetteur d'électron est appelé la « cathode ». Une cathode peut être de deux types :

- à chauffage direct. La cathode est alors aussi le filament.
- à chauffage indirect : la partie émissive est portée à température par le biais d'un filament

Quelque soit le type de cathode, cette dernière utilise des matériaux qui ont la propriété de céder des électrons en grand nombre avec la chaleur. Les cathodes sont portées à des températures de l'ordre de 1000K jusqu'à 2600K. La chaleur communique la quantité d'énergie cinétique suffisante aux électrons qui leur permet de vaincre l'attraction atomique (mais aussi d'autres forces plus complexes). L'effet thermoïonique génère aussi une sorte de pellicule d'électrons enveloppant la cathode.

Le tableau suivant regroupe les cathodes les plus communément utilisées. Il donne en particulier les performances en émissivité, ce qui conditionne directement le courant anodique maximal du tube. En effet il est fondamental de comprendre que la capacité d'un tube en terme de puissance est directement liée aux performances de sa cathode.

<u>Matière</u>	<u>Température d'utilisation (K)</u>	<u>Emissivité mA/watt de chauffe</u>	<u>Emissivité en mA/cm²</u>	<u>Particularités</u>
Tungstène pur	2400-2600	2-10	100-1000	Immunié contre les ions positifs. Peut être utilisé à des tensions d'anodes très élevées. Chauffage très rapide.
Tungstène thorié (ThW)	1800-2000	50-100	700-3000	Bien meilleure émissivité mais moins immunié contre les ions positifs. Peut être utilisé à des tensions de filament réduites ou utilisé pour des régimes impulsions élevés avec peu d'effet sur le vieillissement. Chauffage rapide.
Filament oxyde	1000-1100	200-1000	400-3000	Très haute émissivité par watt de puissance filament mais très sensible aux ions positifs. Les pannes se produisent à basse température si le nuage d'électrons est vidé. Doit être chauffé en douceur avant utilisation, mais le temps de chauffe est cependant assez court.
Cathode oxyde	1000-1100	10-200	1000-3000	Haute émissivité pour de petites cathodes. Temps de chauffe assez long (quelques minutes). Emission crête importante dans les applications pulsées.

L'espérance de vie d'un tube exploité dans des conditions normales est principalement liée à l'espérance de vie de sa cathode.

Une cathode usée est une cathode dont l'émissivité est réduite dans une proportion ne permettant plus un fonctionnement nominal du tube.

En fait un tube de puissance peut tout à fait rester utilisable même si sa cathode commence à montrer des signes de faiblesse, mais dans ce cas il sera soit mis soigneusement de côté comme tube de secours ou bien utilisé dans un étage d'amplification à plus faible puissance.

1.1.1 Empoisonnement de la cathode

Le danger principal qui guette une cathode est son « empoisonnement » par les ions positifs créés par ionisation des molécules de gaz résiduelles dans le tube. Ces molécules sont ionisées lorsqu'elles rentrent en collision avec les électrons émis par la cathode (ces derniers ont une énergie cinétique suffisante pour déloger plusieurs électrons de l'atome d'où la formation d'un ion positif). Plus la tension anodique est forte plus les électrons sont énergétiques ce qui favorise la formation de ces ions. De plus ces ions ayant une masse beaucoup plus importante que les électrons et étant fortement accélérés par le champ électrostatique cathode-anode, ils acquièrent une énergie cinétique considérable.

Les ions ou microparticules ionisées qui viennent à bombarder et à se combiner sur la surface active de la cathode (surtout les cathodes oxydes très réactives) lui font perdre progressivement son émissivité. Par conséquent la performance du tube se dégrade (puissance utilisable plus faible).

Heureusement, le nuage d'électron qui enveloppe naturellement la surface de la cathode forme une sorte de barrière protectrice face à ces ions (ou tout du moins une grande partie de ceux-ci). Ces électrons en grande densité « balayent » les ions qui viennent se rapprocher de la surface de la cathode.

Le nuage d'électron qui entoure une cathode joue ainsi un rôle fondamental sur la protection et la durée de vie d'une cathode. Un tel nuage ne doit jamais être vidé ou « pompé » sinon les ions positifs viendraient bombarder la cathode et se recombinaient aux éléments actifs (en particulier les oxydes). De même un tube ne doit jamais être utilisé avec une cathode « froide » c'est-à-dire à une température où la couche d'électrons n'est pas alors formée. Une cathode froide, surtout une cathode oxyde, est assimilable à un guetter...

1.1.2 Cathode à tungstène thorié

Les tubes de forte puissance de la famille des 3CX10000 et plus généralement les tubes travaillant à très haute tension anodique (> 4 kV) utilisent des cathodes en tungstène thorié.

Le tungstène est le premier métal à avoir été utilisé pour fabriquer des cathodes pour les raisons qu'il est le seul métal à pouvoir être porté à la température suffisante pour permettre une bonne émissivité grâce à sa température de fusion très élevée (> 3600 °K). Cependant, en terme de rendement d'émissivité (vis-à-vis de la puissance de chauffe à appliquer), le tungstène pur n'est pas très intéressant.

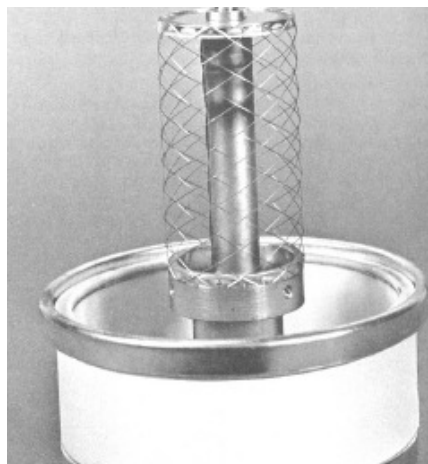
En fait une petite quantité de thorium est rajouté au tungstène. Lors de la fabrication, cette petite quantité de thorium (1,5%) est ajoutée sous forme d'oxyde de thorium. On ajoute également un corps réducteur (carbone) au tungstène pour former une couche externe de carbure de tungstène sur environ 25% de la section de la cathode. Au cours de la fabrication la cathode est portée à une très forte température de façon à réduire l'oxyde de thorium par le corps réducteur et libérer le thorium métallique. La cathode est ensuite chauffée à une température plus faible pendant un temps assez long afin de diffuser le thorium à la périphérie de la cathode où il se présente sous forme d'un film atomique de très faible épaisseur. Les atomes de thorium ainsi libérés constituent la couche émissive de la cathode et améliorent significativement l'émissivité par rapport au tungstène pur.

Pendant la vie normale du tube ce phénomène chimique se perpétue lorsque le filament est chauffé. La cathode est chauffée à une température de l'ordre de 2000 °C. Progressivement la cathode se décarbure jusqu'au point où tout le carbure de tungstène a été entièrement consommé et alors la réduction de l'oxyde de thorium en thorium libre s'arrête.

Nous voyons bien ici l'importance de maîtriser au mieux la puissance de chauffe d'une telle cathode pour optimiser la durée de vie du tube.

Le tungstène est un des rares matériaux à offrir une immunité totale contre le bombardement des ions positifs. Cette immunité signifie que la durée de vie du tube n'est altérée ni par des courants excessifs (c'est-à-dire « vidant » brutalement le nuage d'électrons protecteur), ni par une mise en fonctionnement accidentelle du tube cathode froide ou avec une tension filament insuffisante.

Toutes ces bonnes propriétés expliquent donc l'utilisation des cathodes au tungstène thorié pour les tubes de très forte puissance et la durée de vie en général supérieure à celle des tubes à cathode oxyde.



Exemple d'une cathode en tungstène thorié à structure hélicoïdale (le tube à l'intérieur est un support)

1.1.3 Cathode oxyde

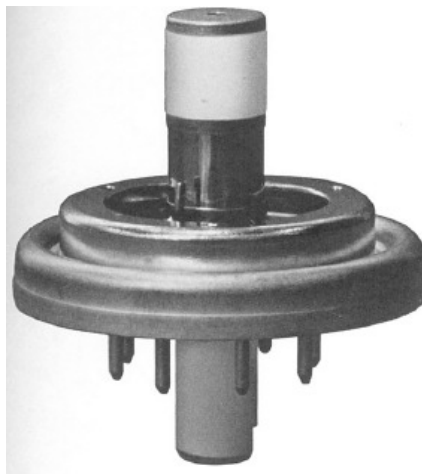
La seconde grande famille de cathode que nous rencontrons souvent dans nos tubes au niveau amateur de plus faible puissance (6X4, 4CX250 etc.) est la cathode à métal oxyde ou encore « cathode oxyde ». Dans ce type de cathode une couche d'oxyde est déposée sur une surface métallique qui est chauffée par un filament (chauffage indirect). Parmi les oxydes les plus utilisés nous rencontrons des oxydes de Baryum, de Strontium, de Calcium.

Les cathodes oxydes sont très sensibles au bombardement des ions positifs. Les matériaux actifs constituant sa surfaces se dégradent très vite par cet « empoisonnement » d'ions (irréversible). C'est pour cette raison que les tubes utilisant des cathodes oxydes ont des tensions anodiques ne dépassant guère les 3000V (afin de limiter l'énergie des ions).

Pour les mêmes raisons, lors de l'utilisation du tube, des défaillances sérieuses peuvent se produire si :

- le tube est mis en fonctionnement avant la fin de temps de warm up (le nuage d'électron protecteur n'est pas encore entièrement formé)
- la haute tension d'anode est excessive (accélération de la formation et du bombardement des ions positifs)
- le courant anodique est trop important (pompage excessif du nuage d'électrons)
- la tension de filament est trop basse

Ainsi c'est pourquoi les tubes à cathodes oxydes doivent avoir de longues durées de warm-up, en général de plusieurs minutes, et si possible contrôlées, avant d'appliquer la haute tension et faire circuler un courant dans le tube. D'autre part ces tubes (3CX1500, 8877, 6X4, etc...) ne doivent JAMAIS être exploités à des tensions de filament réduites. Cela ne ménage pas leur durée de vie, contrairement aux cathodes à tungstène thorié (et encore sous certaines conditions), et de plus cela entraînera des arcs internes dans le tube (réduction significative du nuage d'électrons « écran » et donc favorisation de conduits ionisés entre la surface de l'anode et celle de la cathode). Ces arcs rendent dans tous les cas le tube irrécupérable.



Exemple d'une cathode oxyde similaire à celle utilisée dans une 4CX250.

1.2 L'anode

L'anode est portée à un potentiel élevé. Cela génère un champ électrique qui attire les électrons depuis la cathode. Les électrons sont accélérés et leur impact sur l'anode libère de l'énergie thermique. La puissance communiquée à l'anode à tout instant est simplement le produit du courant anodique par la tension anode-cathode.

La spécification de la puissance de dissipation anodique est la puissance moyenne que l'anode est capable de dissiper (dans les conditions de ventilation spécifiées) sans atteindre des températures excessives.

Contrairement aux transistors, la dissipation anodique instantanée peut être très importante (seule la dissipation moyenne compte) car la capacité thermique de l'anode est importante. Dans le cas des transistors la température de jonction augmente très vite car l'inertie thermique est faible, et peut, contrairement au tube, être instantanément destructeur.

1.2.1 Les tubes à anodes internes



Beaucoup de tubes de puissance utilisent des anodes internes, surtout les tubes HF. Ces tubes peuvent utiliser n'importe quel type de cathode ou de grille bien que les tubes de très forte puissance utilisent plus couramment des cathodes de type filaments de tungstène thorium. La dissipation de la chaleur est réalisée par radiation infrarouge au travers de l'enveloppe du tube qui est alors en verre transparent. La partie restante de la chaleur est dissipée par conduction thermique via l'enveloppe et par les broches externes.

Les matériaux utilisés dans la fabrication d'une anode interne varient selon le type de tube et selon le fabricant. Les matériaux de base utilisés sont le molybdène, le tantale et le graphite.

Les matériaux doivent être mécaniquement et électriquement stables sur une très large gamme de température.

Les anodes internes des tubes de puissance (par exemple une 3-500Z) sont presque toujours recouvertes d'un matériau actif servant de getter. Le getter sert à absorber les molécules de gaz résiduelles dans le tube. Cela est nécessaire car n'importe quel gaz résiduel crée des ions positifs, néfastes comme nous l'avons vu pour la cathode et donc pour la durée de vie du tube. De plus, même le plus petit résiduel de gaz réduit significativement la tension de claquage d'un tube et augmente par là-même de façon importante la probabilité d'arc interne (bang !).

Nota : la tension anodique dans un amplificateur correctement accordé approche le double de la tension anodique de polarisation. Dans le cas d'un mauvais réglage de l'accord ou du load de l'amplificateur, ou dans le cas d'une défaillance de la charge, ou bien encore dans le cas d'un drive excessif, la tension anodique crête peut atteindre plusieurs fois la tension anodique de polarisation et alors créer un arc interne (entre l'anode et la grille ou la cathode). En général, il est d'usage de sélectionner un tube possédant une tension de claquage quatre fois ou plus supérieure à la tension anodique de polarisation.

Le matériau le plus couramment utilisé pour les getters est le zirconium. C'est le zirconium qui est utilisé par exemple sur la surface extérieure des anodes en graphite ou en molybdène dans la 3-500Z, 811A ou 572B. C'est la poudre grise ou les textures granuleuses que l'on peut voir recouvrant la surface de l'anode.

Le zirconium réalise au mieux son action absorbante aux alentours de 1000°C. C'est pour cela que les anodes qui en sont recouvertes doivent travailler à ces températures avec, pour effet visuel, une couleur rouge sombre à rouge clair.

Le zirconium dégage aussi certains gaz et en absorbe d'autres selon la température. Ainsi la variation de la température de l'anode le long de sa structure, ainsi que la variation de la température liée au régime d'émission, permet d'activer le getter sur toute sa plage d'efficacité et d'absorber ainsi une large variété de gaz.

Ainsi pour ces tubes l'anode est conçue et DOIT atteindre ces températures en régime normal. Les anodes de ces tubes doivent donc rougir lorsqu'ils sont exploités en émission, ce n'est pas seulement plaisant pour les yeux, mais c'est vital pour préserver le bon fonctionnement et la durée de vie du tube ! Cela est particulièrement critique puisque dans ce type de tube en verre le vide se dégrade assez rapidement (pour des raisons que nous évoquerons) et un flash est quasiment garanti à la première application de la haute tension si le tube a été inutilisé pendant plusieurs années.

1.2.2 Les anodes externes



Les tubes à anodes externes, tout comme les tubes à anodes internes, peuvent employer n'importe quel type de grille et de cathode.

Le design à anodes externes procure une dissipation anodique importante tout en conservant une dimension d'anode relativement « petite » à l'intérieur du tube.

Si le tube emploie une cathode oxydes c'est-à-dire une cathode compacte, alors la structure interne plus compacte de l'anode va de pair et permet ainsi de monter plus haut en fréquence (VHF, UHF) et d'obtenir un gain plus important (les électrons sont mieux focalisés et mieux contrôlés par le champ électrostatique de la(les) grille(s)).

La montée en fréquence est essentiellement liée au fait que le trajet des électrons entre la cathode et l'anode est réduit grâce à cette configuration.

1.3 La grille

La grille sert à contrôler le mouvement des électrons par le biais du champ électrostatique qu'elle va créer avec la cathode. Malgré sa structure filaire « trouée » l'ensemble des fils la constituant forme, vu des électrons émis par la cathode, un champ électrostatique qui domine celui créé par l'anode.

Les grilles sont en général fabriquées dans du métal très dur présentant une dilatation thermique minimale sur une large plage de température. Le métal de base utilisé dans les tubes de forte puissance est le tungstène. Il est en général plaqué or afin de limiter le phénomène d'émission secondaire d'électrons (néfaste pour le rendement du tube). Cela est particulièrement vrai pour les tubes à cathode oxyde en raison de leur forte émissivité.

En règle générale, l'oxyde est déposé en bandes ou en cercles sur la surface de la cathode. Les fils de la grille sont alignés précisément de sorte à être situés juste au dessus des zones de séparation de ces bandes actives. La 8877, par exemple, possède une cathode de gros diamètre (>2,5cm) sur laquelle pas moins de 140 bandes concentriques d'oxyde ont été déposées. On s'imagine alors la précision demandée sur la réalisation et le positionnement de la grille pour que chaque fil de celle-ci

soit aligné ! *Nota : Un défaut de fabrication à ce niveau a expliqué la défaillance de certains lots de production de 8877.*

Cette technique de construction permet de ne pas exposer les fils de grille aux faisceaux d'électrons. Sinon ceux-ci percuteraient en trop grand nombre les fils de grille et avec leur énergie cinétique viendraient arracher l'or (surtout si le potentiel de la grille venait à être positif par rapport à celui de la cathode), et ceci même à faible température.

Cette technique permet également d'assurer un courant de grille très faible (bénéfique) et une bonne caractéristique en distorsion du tube.

Enfin, un avantage, et pas des moindres, est de permettre de rapprocher d'avantage la grille de la cathode et donc d'assurer un gain plus important.

Malheureusement, cette technique, bénéfique pour le gain du tube et le courant de grille, pose de très sérieuses contraintes de fabrication. Le faible écartement grille-cathode augmente les chances d'un court-circuit et l'alignement très fin nécessaire pour la grille peut entraîner des problèmes d'alignement (qui doit être réglé au dixième de mm). En cas de mauvais alignement les collisions des électrons sur la grille vont entraîner une évaporation de l'or déposé sur le fil de grille à l'intérieur du tube (ce phénomène n'a rien à voir avec une fusion de métal ou « arrachage » de particules). L'or va alors se répandre dans le tube sous forme gazeuse et, en se refroidissant, va se déposer à l'état solide sur les surfaces internes du tube. Ainsi il va venir empoisonner la cathode ou, pire, venir se redéposer proche de l'anode ce qui favorise, et parfois déclenche, des courts circuits internes. Ces courts circuits provoquent des arcs internes. Ces derniers peuvent des fois éliminer (vaporiser) le court-circuit et le tube peut alors fonctionner à nouveau. Mais en général, une fois que le problème commence, la santé du tube n'ira qu'en se dégradant jusqu'à le rendre inutilisable.

C'est l'origine de défaillance la plus fréquente des tubes à cathode oxyde.

L'anode et la grille travaillent normalement à des températures plus faibles que celles pouvant déclencher une émission thermoïonique. Un petit courant parasite va néanmoins circuler entre la grille et l'anode mais, en fait, la majeure partie de ce courant est surtout due aux ions issus des résidus de gaz dans le tube.

L'élévation de la température de la grille est causée en premier lieu par l'énergie cinétique des électrons de la cathode venant s'y percuter. Dans le pire des cas, cette élévation de température peut atteindre un point où la grille commence à montrer une propriété d'émission thermoïonique.

Il est erroné de penser que la valeur de dissipation maximale de grille spécifiée dans les datasheet correspond à une défaillance de la grille (certains pensent même à une fusion ou à une déformation de la grille) mais en fait cette valeur correspond à la puissance nécessaire à communiquer à la grille pour l'élever suffisamment en température au point où elle commence à présenter une émission thermoïonique. Dans ce cas les performances nominales du tube, c'est-à-dire celles spécifiées dans la datasheet, se dégradent et ne sont plus garanties.

La seule façon de préserver la bonne santé d'une grille (c'est-à-dire cette fois dans une optique de défaillance) est de surveiller le courant grille et d'utiliser un circuit de protection rapide.

Les tubes à cathode tungstène-thorium possèdent des grilles en tungstène (3-500Z par ex.) et ces dernières peuvent être utilisées sans dommage à des températures très élevées où elles commencent à rougir.

Il y a donc une grande différence de robustesse de grille entre ces deux types de tubes et donc de précaution à observer.

Tout amplificateur utilisant un tube à cathode oxyde doit être pourvu d'un circuit de protection de grille RAPIDE. Les systèmes à fusible ou à résistance n'offrent aucune protection.

La dissipation grille ne peut pas être calculée simplement en multipliant la tension rms de grille par le courant rms de grille. De même que pour calculer une dissipation anodique, le vrai calcul nécessite d'intégrer dans le temps la fonction donnant la dissipation instantanée le temps d'un cycle HF. Des logiciels de simulation permettent de réaliser ce calcul (ils ont en général mis à disposition par les fabricants de tubes).

Dans un étage où le tube est commandé par la grille, si la puissance RF injectée dans la grille est connue avec précision, la dissipation grille peut alors être calculée en déduisant de cette puissance celle correspondant à la polarisation grille. En revanche cette méthode fonctionne moins bien dans les circuits à commande par cathode parce que la puissance de drive est « mélangée » avec la puissance de sortie.

Les causes de défaillance principales des grilles sont résumées ci-dessous :

- courant de grille excessif pour les grilles plaquées or (cas des tubes à cathode oxyde) causant une « évaporation » de l'or pouvant être catastrophique pour le tube
- mauvais alignement des fils de la grille par rapport aux bandes émissives des cathodes oxydes créant des « points chauds » dégénératifs (sans pour autant se traduire au niveau exploitation par un courant grille excessif)
- le plaquage or n'est jamais parfait et des petites particules peuvent se détacher de la surface de la grille et provoquer des courts-circuits
- mauvaises soudures ou assemblage provoquant un déplacement mécanique de la grille au dessus de la cathode (courts circuits)

1.4 Les filaments

La durée de vie d'un filament est une fonction complexe dépendant de la fréquence d'utilisation (= chocs thermiques), des chocs mécaniques, de la température. Il est important de ne pas dépasser la plage de tension recommandée par le fabricant.

Dans le monde radioamateur, les filaments sont très rarement mis en service suffisamment longtemps pour présenter des défaillances liées à un effet de vieillissement. La cause principale des défaillances des filaments dans l'usage amateur est liée à l'accumulation des chocs thermiques résultant de l'alternance des mises sous tension.

Afin de ménager un filament, il est nécessaire de respecter le temps de chauffe (warm-up) préconisé par le fabricant. Ne pas oublier que si un système de soft start est utilisé ce dernier augmente d'autant la durée du warm up.

1.5 Défaillance et fiabilité des tubes

1.5.1 Il y a des bons et des mauvais tubes...

Les tubes sont des composants très robustes mais, paradoxalement, dans n'importe quel amplificateur à tube, la première source de défaillance est le tube lui-même. Dans le monde amateur les tubes souffrent d'avantage de défaillance provenant de la qualité inégale de fabrication plutôt que de défaillances liées à leur exploitation, et encore moins à cause de leur durée d'utilisation (extrêmement modeste par rapport aux utilisations professionnelles).

Les tubes étant très difficiles à produire (processus de fabrication extrêmement complexe), il faut d'emblée admettre que deux tubes portant la même référence et issus du même fabricant peuvent être de qualités différentes. Un tube donné pourra fonctionner à merveille tandis qu'un autre flashera au bout de quelques heures d'utilisation ... Il faut donc admettre cette réalité.

De façon générale les tubes céramiques à cathode en tungstène thorié ont une durée de vie bien supérieure et une meilleure fiabilité que les autres types de tubes. Ils combinent toutes les qualités : un faible dégazage, une cathode et des grilles robustes.

1.5.2 Le gaz : ennemi permanent des tubes

Les tubes utilisés fréquemment chez nous, les radioamateurs, sont des tubes issus d'anciens stocks datant de plusieurs années (voir décennies). Même si ces tubes n'ont jamais servis ils doivent être utilisés avec attention car ils ont accumulé du gaz.

Ce gaz peut provenir des fuites au niveau du scellement de l'enveloppe du tube, de la porosité de l'enveloppe et aussi du dégazage des éléments internes du tube.

Il est à noter que la chaleur dans le tube accélère le dégazage des matériaux, en principe très faible car cette opération est déjà réalisée en production du tube et les matériaux en questions sont déjà sélectionné pour leur faible dégazage, typiquement le nickel.

Plus gênant, comme nous l'avons évoqué, les gaz engendrés par l'usure de la grille par bombardement électronique (Cf chapitre sur les grilles).

Les tubes dits « céramiques » présentent la meilleure étanchéité et peuvent être stockés très longtemps.

Par contre les tubes en verre ont tendance à fuir d'avantage. Ce n'est pas le verre qui en lui-même fuit mais l'alliage de Kovar®¹ utilisé pour réaliser le scellement verre/métal au niveau des broches. En effet le Kovar® est sujet à l'oxydation. Ainsi les tubes en verre doivent être stockés à l'abri de l'humidité. Du fait de leur tendance à dégazer facilement, leur durée de stockage est beaucoup plus courte que les céramiques. De tels tubes devraient être mis en service de temps en temps et non pas mis à l'arrêt sur de longues périodes. Cela est d'autant plus vrai que le tube est de forte puissance. La même conclusion s'impose quand au rythme d'utilisation des amplificateurs à tubes. De façon générale il vaut mieux mettre sous tension de temps en temps un amplificateur à tube plutôt que de le laisser non utilisé sur une longue période et être obligé de suivre une procédure de reconditionnement du(des) tube(s).

1.5.3 Quand les tubes flashent

Même en quantité infime, c'est-à-dire même après pompage industriel, les molécules de gaz résiduelles peuvent provoquer des arcs dans le tube.

Les molécules de gaz en s'ionisant vont créer, si leur densité est suffisante, un conduit à très faible impédance aligné sur les lignes de champ électriques. Ce conduit est analogue à un véritable court circuit.

L'émissivité d'une cathode est toujours limitée (effet de saturation) et conditionne le courant maximal que peut débiter un tube (rappelez vous que la cathode est le cœur du tube et en limitent ses performances). Ce courant de saturation est bien plus faible que le courant qui traverse le tube quand un flash (ou arc) se produit (= bang !). Pour produire l'arc tant redouté il faut que la différence de potentiel entre l'anode et la grille ou la cathode dépasse la tension de claquage du tube. Il y a deux cas de figure possible pour cela :

- le tube est « sein » (sans contamination gazeuse) et la tension crête anodique dépasse la tension de claquage normale du tube. Le défaut provient de l'utilisation du tube (mauvais accords, rupture de la charge par ex)
- le tube est défectueux (gazeux) et la tension anodique est normale. Dans ce cas la tension de claquage est réduite soit à cause d'un excès de gaz dans le tube, soit à cause d'une défaillance mécanique du tube

Dans ces deux cas un arc interne se produit dans le tube. Le courant n'étant limité que par les limitations de courant éventuelles disponibles dans l'alimentation de l'amplificateur, l'arc aura une énergie redoutable et destructrice.

1.6 Utiliser des tubes anciens

Avant d'utiliser un tube ancien, il est absolument nécessaire de suivre certaines procédures de reconditionnement ayant pour objectif d'éliminer autant que soit possible ces résidus de gaz accumulés.

¹ Le Kovar® (marque déposée) est un alliage FeNiCo à faible coefficient de dilatation thermique. Il est utilisé pour le scellement verre/métal ou céramique/métal dans une large plage de température et pour de multiples applications. En effet, il présente un coefficient de dilatation thermique voisin de ceux de verres durs comme le verre borosilicate employé dans la fabrication de l'enveloppe.

La méthode la plus couramment employée consiste à activer le getter du tube dont la fonction principale est justement d'absorber les molécules de gaz.

Les tubes céramiques ou à anode externe, du fait que leurs anodes fonctionnent à basse température (comparativement aux anodes internes) ont leur getter non pas disposés sur l'anode mais sur la cathode ou à proximité du filament. C'est en effet le seul endroit du tube où la température est suffisamment élevée pour activer un getter.

Ainsi le reconditionnement d'un tube céramique peut se réaliser en se contentant de faire chauffer le filament. En général le temps nécessaire est de l'ordre de plusieurs heures à une journée entière. Dans le doute il est recommandé de laisser le tube chauffer durant un jour ou deux. Si le tube n'est pas bien reconditionné au bout de ce laps de temps il est fort peu probable que le vide d'origine puisse être restauré. Mieux vaut se passer de ce tube.

Les tubes en verre à anode interne ont en général, comme nous l'avons vu, leur getter déposé sur la surface de l'anode. Mais pour l'activer il faut par définition faire chauffer l'anode et donc mettre en service le tube !

Sous certaines conditions un tel tube peut être reconditionné en l'exploitant à faible tension anodique (pour éviter l'arc) et en appliquant une tension de grille positive (accélérer au maximum les électrons sans risque nous l'avons vu pour la grille si elle est en tungstène pur). Cela peut permettre d'atteindre une température d'anode suffisante et en laissant ainsi le tube pendant plusieurs heures il peut être reconditionné et réutilisé. Cette méthode semble donner un taux de succès de 50% pour des tubes de type 3-500Z non utilisées depuis plusieurs années.

En général un arc interne dans un tube a un effet de getter. C'est pourquoi certains tubes peuvent se mettre à fonctionner parfaitement après avoir flashé.

Il n'est pas rare, du reste, que dans certains processus de fabrication on provoque volontairement un arc dans le tube (de façon très contrôlée !) durant la phase de pompage.

Il est cependant difficile d'en déduire une quelconque procédure quand au reconditionnement d'un tube. La science des tubes n'est malheureusement pas exacte à ce point !

Comme nous l'avons écrit, il faut accepter que certains tubes soient meilleurs que d'autres ainsi dans un même lot de vieux tubes certains pourront être récupérés tandis que d'autres devront rester au musée.

1.7 Prendre soin des tubes au quotidien

Terminons par quelques points à considérer pour assurer une durée de vie et une santé optimale pour nos tubes.

Tubes à cathode en tungstène thorié:

- éviter les longues périodes de dissipation grille et anode excessives
- éviter les longues périodes de non utilisation
- éviter de porter le filament à une tension supérieure à la tension nominale
- utiliser si possible un soft start pour le filament
- ne pas exposer le tube à des chocs ou à des vibrations
- utiliser un système de limitation de courant d'anode en cas d'arc interne (résistance en série dans l'alim). Doit être dimensionnée pour limiter le courant d'arc à 40A max et tenir la haute tension de l'alimentation. En général résistance bobinée de puissance (100W) entre 20 et 60 Ohms.
- éviter les températures excessives sur l'enveloppe du tube et plus particulièrement sur les zones soudés/assemblées (brasage céramique-métal, au niveau des broches etc..)

Tubes à cathode-oxyde

- éviter les longues périodes de dissipation anodique excessive
- éviter les périodes, même très courtes, de dissipation grille excessives en utilisant un circuit de protection rapide (<1s)
- éviter de porter le filament à des tensions inférieures ou supérieures à la tension nominale, respecter la tension nominale à +- 3%
- utiliser un circuit de soft start pour le filament

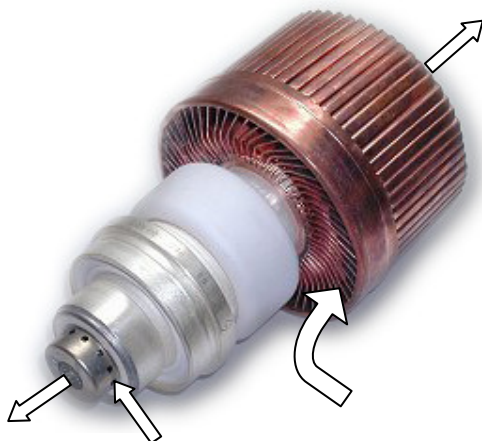
- toujours attendre la fin du warm up pour appliquer la haute tension et faire débiter du courant au tube
- ne jamais appliquer une tension anodique excessive
- ne pas exposer le tube à des chocs ou vibrations
- utiliser un système de limitation de courant d'anode en cas d'arc interne (résistance en série dans l'alim). Doit être dimensionnée pour limiter le courant d'arc à 40A max et tenir la haute tension de l'alimentation. En général résistance bobinée de puissance (100W) entre 20 et 60 Ohms.
- éviter les températures excessives sur l'enveloppe du tube et plus particulièrement sur les zones soudées/assemblées (brasage céramique-métal, au niveau des broches etc..)

Bien ventiler l'ensemble du tube et non pas seulement les ailettes de refroidissement de l'anode. En particulier les parties soudées du tube (brasures céramique – parties métalliques) ne doivent pas dépasser les 200°C sinon des molécules emprisonnées lors de la fabrication du tube vont être libérées et risqueraient de venir empoisonner la cathode.

L'excès de ventilation ne peut être que bénéfique pour un tube. Il faut donc être généreux et ne pas hésiter à surdimensionner la ventilation.

La ventilation au niveau de la cathode est également nécessaire.

A ce sujet les petits trous ainsi que le petit grillage à la base d'une GS35 sont prévus pour permettre le passage d'un flux d'air de refroidissement (voici peut être une énigme résolue pour certains !).



Passage de l'air de refroidissement pour une GS-35

1.8 Considérations diverses à propos des tubes

Terminons en évoquant divers points que chacun a certainement du se poser au moins une fois :

- Les enveloppes céramiques peuvent-elles être de couleurs différentes. Blanches ou roses cela est juste le résultat d'un processus de fabrication un peu différent de la céramique. Selon la composition chimique la couleur est différente mais les propriétés de la céramique restent les mêmes.
- Plus sérieusement, l'apparition d'une lueur colorée à travers l'enveloppe céramique des tubes de puissance en émission soulève la curiosité. Cette lueur, pour un tube en bonne santé est normale. On l'observe facilement dans l'obscurité, par exemple, sur des tubes de type GS35, GS31 etc.. Le phénomène qui explique cette lueur provient de l'émission secondaire d'électrons quand ceux-ci frappent à haute vitesse l'anode mais aussi les électrons « perdus » émis par la cathode. Ces deux types d'électrons vont causer l'apparition d'une couleur lorsqu'ils viennent frapper la céramique du tube. Cette lueur est alors d'autant plus intense (mais toujours faible) que la tension anodique est élevée comme c'est le cas pendant la phase d'émission. La couleur est en général un bleu sombre avec un aspect légèrement filamenteux.

Mais d'autres couleurs ont été observées (vert, rose...). Profitez de cette lumière agréable à l'œil! Et surtout il n'y a pas à s'inquiéter c'est un phénomène normal. Il se rencontre aussi pour les tubes en verre. Par contre si cette lumière apparaît lorsque le tube est au repos et entre l'anode et la cathode, c'est-à-dire provenant de l'intérieur du tube, il y a de bonnes raisons de s'inquiéter, le tube est gazeux.



GS-35



Tube gazeux :



- La surface argentée visible sur la surface interne de l'enveloppe en verre est en fait l'évaporation de métal (souvent du baryum) résultant de l'activation du getter. A la fin du processus de fabrication du tube, le getter est chauffé à très forte température (par induction, c'est pour cela qu'il a la forme d'un creuset en anneau) ce qui vaporise le métal actif sur la surface en verre. C'est ce film métallique vaporisé qui est actif et non pas la substance qui reste dans le creuset. Si cette surface est de couleur blanche cela signifie que le tube est gazeux. Ces getter à évaporation ne sont pas utilisés dans les tubes de puissance car, évidemment, le film métallique risquerait de créer des courts-circuits internes. Dans les tubes de puissance on utilise plutôt des getter à l'état solide (zirconium, titane) activés par les éléments chauds du tube (anode ou filament).
- La pression typique régnant dans un tube est de l'ordre de 10^{-7} Torr soit 10^{-7} mbar. A cette pression de vide poussé il y a « encore » 10^8 molécules de gaz dans un cm^3 contre $3 \cdot 10^{19}$ molécules dans l'air ambiant.

Quelques illustrations en image de la structure interne de deux tubes bien connus :



Anode d'une GI-7B. Elle est en cuivre pour mieux répartir et véhiculer la chaleur.



La grille et la cathode.



Anode d'une GS-31 (qui a sérieusement flashé).



La cathode et la grille. Les deux points noirs sur la cathode sont les traces de l'arc.

1.9 Le mot de la fin

J'espère que cette discussion aura permis de faire comprendre certains points importants au sujet de la technique des tubes de puissance et permettre ainsi de mieux savoir les utiliser. Cette discussion n'a rien d'exhaustive et bien entendu certains tubes peuvent avoir des technologies assez différentes que ce qui a été exposé.

A chacun ensuite de compléter ses connaissances par sa propre expérience de fabrication d'amplis à tubes et par la lecture d'ouvrages de références sur le sujet.

73 de Matthieu F4BUC

f4buc@orange.fr

<http://pagesperso-orange.fr/f4buc/>

Annexe : Système de numérotation

Voici le système de numérotation de chez Eimac, très connu et très souvent utilisé par les autres fabricants. Le code utilisé est facile à décoder et suit une logique claire.

Premier nombre = nombre d'éléments actifs du tube

2 = diode (une cathode et une anode)

3 = triode (une cathode, une grille et une anode)

4 = tétrade (grille écran en plus)

5 = pentode

Première lettre = type de l'enveloppe

Rien ou « -« = verre

C = céramique

Seconde lettre = type d'anode

Rien ou « -« = anode interne

X = anode externe

W = refroidissement à eau

V = refroidissement par vaporisation

Le groupe de chiffre suivant correspond à la dissipation anodique (pour certains tubes la dissipation réelle est supérieure à ce chiffre, se référer aux databooks).

La dernière lettre indique le type des connections du tube

Rien = broches rigides

A ou Z = coaxial ou broches rigides

F = broches souples

Enfin le dernier nombre indique la plage de valeur du mu du tube.

1 = le plus faible

7 = le plus élevé

Les tubes entre 1 et 5 sont les mieux adaptés pour un contrôle du tube par la grille.

Au dessus le tube est plus adapté à un contrôle par la cathode (comme c'est le cas dans la configuration à grille mise à la masse).

Exemple : 3CX3000F7 est une triode à enveloppe céramique et anode externe (c'est-à-dire dont l'anode communique avec l'air extérieur pour le refroidissement). Sa dissipation anodique est de 3000W, ses connections sont de types souples et elle possède le mu le plus élevé (ce tube sera bien utilisé en configuration grille à la masse).

Certains tubes ont des lettres additionnelles rajoutées comme par exemple : 4PR1000 ou 3CPX800A7. Le « P » signifie en général un design conçu pour une application pulsée et le « R » signifie une conception durcit pour les environnements sévères (aéro, militaire..).