

Tension filament des tubes d'émission : chauffe qui peut !

La précision et la constance de la tension d'alimentation des filaments des tubes d'émission, en particulier pour un PA ou un linéaire, est très importante pour assurer une bonne longévité aux tubes d'émissions radiofréquences. Cette tension doit rester en permanence à une valeur qui se situe dans les tolérances fixées par le constructeur du tube d'émission. Une tension filament trop faible est tout aussi nuisible qu'une tension trop élevée. Ceci n'est pas à prendre à la légère : nous verrons pourquoi dans cet article.

Le filament est en général alimenté en courant alternatif par l'intermédiaire d'un enroulement secondaire d'un transformateur d'une alimentation principale d'un appareil radio. Cet enroulement secondaire est parfaitement calibré pour délivrer une tension appropriée au filament du tube d'émission. Comme tout transformateur, le primaire de celui-ci doit être alimenté par un réseau de distribution d'énergie électrique dont la tension est normalisée selon le pays ou région où l'appareil est utilisé. La plupart des appareils électroniques disposent d'un sélecteur de tension pour adapter la tension primaire transfo à celle du réseau. Toutefois, parmi le matériel des radioamateurs, il existe de nombreux appareils qui ne disposent pas toujours d'un sélecteur de tension d'une résolution suffisante pour être réglé sur la plage réelle de tension délivrée par le réseau.

Votre distributeur d'énergie électrique et les sociétés qui gèrent l'infrastructure du transport de cette énergie doivent en principe garantir la stabilité de la tension de votre réseau dans une plage aux tolérances définies. Les tolérances de la plage de tension sont généralement respectées sur la grande majorité de la couverture du réseau. Il existe toutefois quelques rares régions décentralisées qui subissent de fortes chutes de tensions lors des pics de consommation d'énergie. La raison est simple : les grandes longueurs des lignes présentent une impédance élevée en courant alternatif (résistance et inductance linéique des lignes) à tel point que les différences de potentiel entre début et fin de ligne deviennent excessives.

Depuis quelques années nous assistons à un nouveau phénomène qui accentue l'ampleur des fluctuations de la tension réseau. Depuis l'avènement et la multiplicité de toutes les sources d'énergie électrique délocalisées, comme par exemple les installations de panneaux photovoltaïques chez de nombreux particuliers, la plage de tension réseau a tendance à s'étendre dans certains quartiers d'habitations vers des valeurs anormalement élevées. En effet, depuis de nombreuses années, l'infrastructure du transport de l'énergie électrique a été prévue pour délivrer une tension respectant les tolérances en tenant compte de la consommation maximale qui puisse être présente le long des lignes électriques. Pour respecter ces tolérances de tension, la tension nominale qui est présente à la source est réglée (et parfois régulée) à une valeur proche mais qui n'excède pas la tolérance maximale. De cette façon, il y a moyen de garantir aux extrémités des lignes de distribution une valeur de tension qui ne descend pas à pleine charge en dessous de la tolérance minimale.

Lorsque les lignes électriques reçoivent de l'énergie à partir des installations délocalisées (panneaux photovoltaïques), la tension réseau peut parfois atteindre localement des valeurs qui outrepassent les tolérances maximales. En effet, la tension de la source en début de ligne restant fixe, on n'accuse non plus le long des lignes une chute de tension par consommation d'énergie, mais bien une hausse de tension par fourniture locale d'énergie. Ainsi, pour une tension nominale donnée en début de ligne, la chute de tension en fin de ligne peut devenir une hausse de tension de la même ampleur. La plage de tension s'en retrouve ainsi étendue vers le haut et peut atteindre pratiquement une étendue totale du double de celle qui a été calculée à l'origine exclusivement pour des consommateurs sans de multiples fournisseurs délocalisés d'énergie électrique.

L'extension de l'étendue de la plage de fluctuation de la tension réseau se répercute dans les mêmes proportions sur l'amplitude des fluctuations de la tension filament des tubes d'émission. Ces variations de tension filament peuvent ainsi atteindre relativement fréquemment des valeurs qui outrepassent les tolérances de tension qui sont déterminées par le constructeur. Les conséquences sont multiples et en général irréversibles pour le tube d'émission.

Alors que faire ? Face à une situation existante, les radioamateurs peuvent s'adapter.

Stabiliser ou réguler la tension réseau de l'alimentation principale de l'appareil radio ?

C'est le premier raisonnement qui vient à l'esprit, mais cela ne constitue pas une solution universelle. En effet, s'il s'agit de réguler la tension réseau de l'alimentation principale d'un linéaire de haute puissance pour un radioamateur détenteur d'une licence et des autorisations appropriées, le dispositif de régulation devra être dimensionné en conséquence. Il apparaît très vite que de telles installations deviennent déraisonnables et inabordables pour ces radioamateurs. L'aspect du dimensionnement en puissance du stabilisateur de tension n'est pas le seul qui entre en ligne de compte. En effet, il ne faut pas oublier que la charge sur le stabilisateur ou le régulateur est éminemment variable : il suffit d'émettre en CW télégraphie ou en SSB pour s'en rendre compte. Les stabilisateurs de tension ou régulateurs de tension réseau sont rarement prévus pour supporter des charges variables dans des proportions aussi larges, mais surtout pour une relative rapidité de variation de charge. Il existe bon nombre de dispositifs stabilisateurs ou régulateurs bon marché qui agissent par sauts de valeurs discrètes (par relais en cascade), mais ceux-ci ne sont pas assez rapides pour nos applications radioamateur en CW ou en SSB. Ce qui risque de se produire, c'est que le dispositif stabilisateur ou régulateur agisse en retard et soit en outre sujet à des instabilités ou oscillations à très basse fréquence.

Pourquoi vouloir à tout prix stabiliser ou réguler l'alimentation principale de l'appareil ?

Les équipements radio sont pour la majorité d'entre-eux constitués d'alimentations avec redresseurs pour différentes branches à courant continu. On y retrouve, entre autres, et par exemple, une alimentation 5V régulée pour des dispositifs de commande, de contrôle ou de sécurité à base de circuits numériques ou à microprocesseur, une alimentation 12V régulée pour des circuits analogiques, une alimentation 24V régulée pour des dispositifs spéciaux de commutation (relais haute tension, relais coaxiaux haute fréquence, etc.), une alimentation régulée pour fixer le potentiel de grille de commande d'un tube d'émission qui est parfois accompagnée d'une alimentation régulée pour le potentiel de grille écran lorsqu'il s'agit d'une tétrode d'émission. L'alimentation de la tension anodique du tube peut parfois être stabilisée ou régulée dans certains appareils d'exception. Avec de tels sous-ensembles électroniques d'alimentations aussi raffinées, les fluctuations de la tension réseau n'ont aucune influence. Il n'y a donc aucun péril pour le fonctionnement du tube d'émission avec des tensions de polarisation d'électrodes qui restent aussi précises et aussi stables grâce aux dispositifs de régulation des branches de l'alimentation principale. Il devient donc inutile d'amener une quelconque stabilisation ou régulation supplémentaire sur la tension réseau en amont de ce groupement de sous-ensembles de régulations existantes.

Cela commence à s'éclaircir !

Que reste-t-il donc à faire ?

Stabiliser la tension filament ?!?

Oui, mais c'est plus vite dit que fait ! En effet, le secondaire transfo qui alimente le filament du tube d'émission fait souvent partie intégrante du gros transformateur de l'alimentation principale. Il faudra donc substituer cet enroulement d'alimentation du filament par un autre dispositif qui sera insensible aux variations de la tension du réseau.

Deux possibilités existent :

- Placer un transformateur auxiliaire de tension secondaire filament et dont le primaire est raccordé sur un dispositif stabilisateur de tension réseau et dimensionné pour la consommation constante en puissance du filament.
- Placer une alimentation régulée avec une sortie en courant continu dont la tension équivaut la tension efficace nominale d'origine sous laquelle le filament du tube doit être alimenté.

Les tubes d'émission dont la cathode est à chauffage indirect (cathode à oxydes) sont en général prévus pour accueillir aussi bien une tension filament en courant alternatif qu'en courant continu ; cette possibilité est mentionnée dans les caractéristiques du tube publiées par le constructeur. Plus loin dans cet article nous vous proposons une application pratique vécue chez un OM passionné de DX. Vous y trouverez plusieurs photos vers la suite de cet article.

Les tubes d'émission dont la cathode est à chauffage direct supportent moins les tensions continues pour le filament. Dans ce cas il faut se résoudre à mettre en œuvre un transfo auxiliaire filament avec un stabilisateur de tension en amont du primaire.

Que peut donc bien influencer la tension filament d'un tube ?

Une seule réponse : la température de la cathode !

Nous verrons plus loin pourquoi cette température de cathode est si critique. Mais avant cela, vous êtes invités à prendre contact avec quelques phénomènes électroniques et thermodynamiques qui se produisent dans l'espace qui entoure directement le filament d'un tube d'émission radiofréquence. Un peu de théorie, pas trop, le stricte minimum, mais juste ce qu'il faut pour comprendre ce qui est important.

Pourquoi chauffer une cathode au rouge dans un tube à vide ? (Chauffe qui peut !?)

Nous vivons au XXI^{ème} siècle une époque formidable où nous bénéficions aujourd'hui des merveilleuses découvertes scientifiques fondamentales du XIX^{ème} et du XX^{ème} siècle ! Nous les devons à des grands scientifiques de ce monde, ne l'oublions pas.

Loi de Richardson (1928) :

Dans chaque métal, il y a des électrons libres qui peuvent quitter la surface de celui-ci sans y revenir à condition qu'il recoivent une quantité suffisante d'énergie. L'énergie minimum nécessaire pour qu'un électron puisse quitter la surface du métal est appelée travail de sortie. Cette énergie est fonction de la nature du métal. La densité de courant (nombre d'électrons émis par unité de temps à partir d'une unité de surface) est fonction de la température du métal.

De nos jours, nous comprenons facilement que l'agitation thermique des atomes constituant un corps métallique puissent donner un niveau d'énergie suffisant aux électrons libres pour éjecter ceux-ci de sa surface créant ainsi ce que l'on appelle une charge d'espace, c'est-à-dire un nuage d'électrons qui entoure une cathode. Ce phénomène est connu sous le nom d'émission thermoïonique ou émission thermo-électronique.

Effet Edison (1880) :

Lorsqu'on place une anode dans l'environnement d'une cathode constituée d'un filament chauffé, les électrons éjectés par le filament sont captés par l'anode placée à un potentiel positif par rapport à la cathode établissant ainsi un courant électrique. Lorsque le potentiel de l'anode est négatif, aucun courant ne circule. C'est la découverte des prémices de la diode à vide.

Loi de Child (1911) et Langmuir (1913) :

Le nombre d'électrons disponibles émis avec une densité de courant donnée à partir d'une cathode est fonction de la tension anodique (selon une loi d'élévation de la tension anodique à une puissance de trois demi). Le facteur d'aptitude de la cathode à émettre des électrons en fonction des caractéristiques géométriques de celle-ci est appelé la pervéance. Lorsque la tension anodique atteint une valeur critique, tous les électrons disponibles sont drainés vers l'anode : régime de saturation. Le courant

anodique en régime de saturation ne dépend plus que de la limite d'émission de la cathode. Même la plus belle cathode du monde ne peut donner que ce qu'elle a. Cette limite est fonction du travail de sortie et est fonction de la température de la cathode.

Qu'en est-il de la résistance du filament ?

La résistance du filament est relativement faible à température ambiante mais cette résistance augmente avec la température du filament à chaud. Lors de la mise sous tension du filament d'un tube d'émission, l'appel de courant est particulièrement élevé, ensuite le courant se stabilise rapidement à une intensité nominale lorsque le filament atteint sa température de fonctionnement.

Pour une lampe à incandescence, par exemple de 100 W 230 V, la résistance du filament de tungstène en fonction de la température est exprimée par la relation suivante :

$$R_t = R_0 \cdot (a \cdot t^2 + b \cdot t + 1)$$

R_t : Résistance [Ω] à la température t [$^{\circ}\text{C}$]

$R_0 = 33 \Omega$: Résistance [Ω] à 0°C (ici pour une lampe de 100 W 230 V)

$$a = 5,1 \cdot 10^{-7} \left[\Omega^2 \cdot ^{\circ}\text{C}^{-2} \right]$$

$$b = 4,8 \cdot 10^{-3} \left[\Omega \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1} \right]$$

Qu'en est-il de la température du filament en fonction de la tension d'alimentation ?

Pour commencer, il faut exprimer la loi d'Ohm, la loi de Joule et la loi de puissance.

$$U = R \cdot I ; W = R \cdot I^2 \cdot t$$

$$P = U \cdot I$$

$$P = \frac{U^2}{R}$$

Dans l'exemple ci-dessus, la puissance nominale de 100 W est atteinte lorsque le filament de la lampe est alimenté sous sa tension nominale de 230 V. Ceci signifie que l'on peut calculer la résistance du filament à la température à laquelle il se trouve dans ces conditions de tension d'alimentation.

$$R_t = \frac{U^2}{P}$$

Par substitution, dans la relation de la résistance en fonction de la température, on obtient l'équation suivante :

$$\frac{U^2}{P} = R_0 \cdot (a \cdot t^2 + b \cdot t + 1) \Leftrightarrow a \cdot t^2 + b \cdot t + \left(1 - \frac{U^2}{P \cdot R_0}\right) = 0$$

Il s'agit d'une équation linéaire du second degré en t . On retiendra parmi les deux solutions possibles uniquement celle qui aboutit à une température positive.

En donnant les valeurs numériques de a , b , P et R_0 de l'exemple ci-dessus, on obtient une relation qui exprime la température du filament en fonction de sa tension d'alimentation :

$$t = \frac{-4,8 \cdot 10^{-3} + \sqrt{618,18 \cdot 10^{-12} \cdot U^2 + 21 \cdot 10^{-6}}}{10,2 \cdot 10^{-7}}$$

On peut tracer un graphe de l'évolution de la température du filament en fonction de sa tension d'alimentation suivant la relation trouvée ci-dessus.

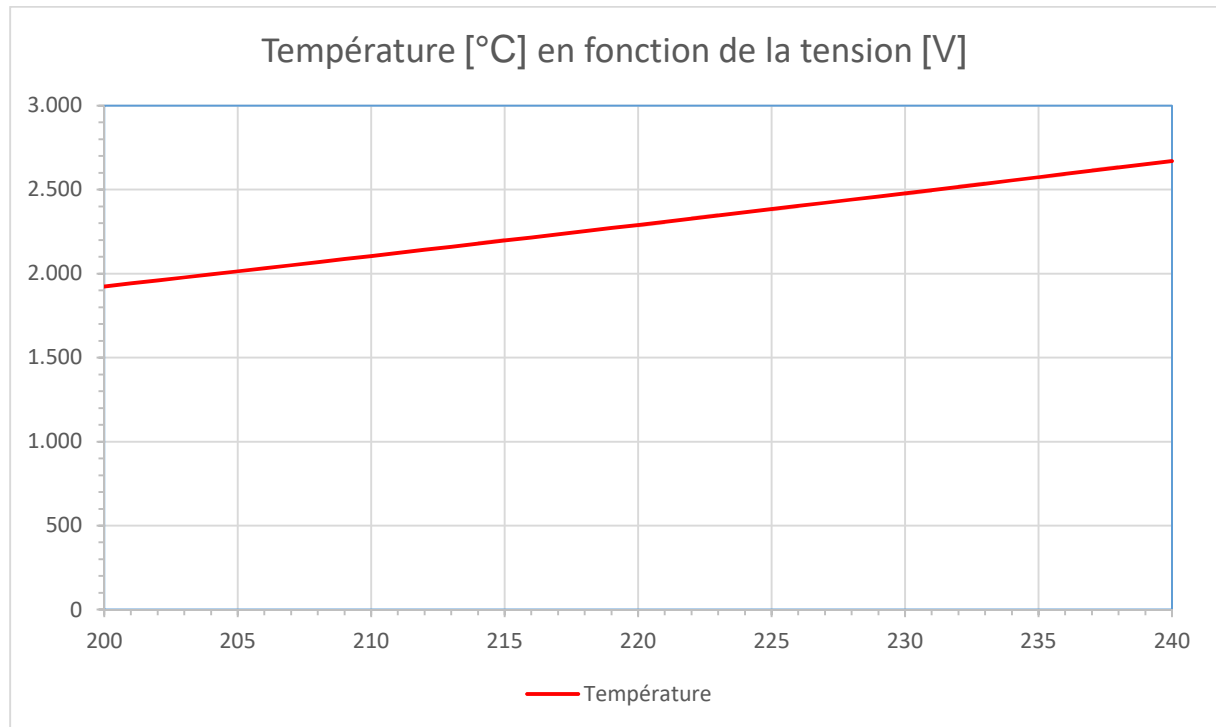


Fig. 1 : Évolution de la température d'un filament au tungstène d'une lampe à incandescence de 100 W 230 V en fonction de sa tension d'alimentation.

On constate grâce à ce graphe que la température du filament en fonction de sa tension d'alimentation est une fonction linéaire du 1^{er} degré. Autrement dit, la température du filament est directement proportionnelle à sa tension d'alimentation.

Dans un tube radio d'émission, la température de la cathode doit être précise et stable. On comprend à présent que c'est la tension d'alimentation du filament qui doit être précise et stable.

Il reste maintenant à examiner les conditions thermodynamiques dans lesquelles se situe le filament d'une cathode dans un tube à vide. En effet, le filament étant alimenté sous une tension définie, il atteint une certaine température qui détermine sa résistance. Il circule dans ce filament un courant d'une certaine intensité et selon la loi de puissance, le filament absorbe donc une puissance bien déterminée, autrement dit une certaine quantité d'énergie par unité de temps. Que devient cette énergie et où va-t-elle ?

Le filament d'un tube d'émission se situe dans le vide qui a été créé dans l'enveloppe du tube qui contient toutes les électrodes. Le filament absorbe une énergie électrique par unité de temps, ce qui le fait chauffer (loi de Joule) et le porte à une certaine température. Pour que la température du filament atteigne un équilibre, il faut bien que la quantité de chaleur produite par unité de temps soit dissipée et absorbée en conséquence. En effet, si cette quantité de chaleur n'était pas dissipée, le filament devrait atteindre une température infinie et entrer en fusion complète.

Comme le filament se situe dans le vide, la seule façon de dissiper son énergie est par un phénomène de rayonnement. Il n'existe aucune conduction ni convection possible dans le vide. On considérera que la dissipation de chaleur du filament par conduction est négligeable le long des fils de connexion vers l'extérieur de l'enveloppe du tube.

Comment un filament rayonne-t-il et dissipe-t-il son énergie dans le vide ?

Il a fallu le concours de plusieurs grands scientifiques pour expliquer ce phénomène. Nous mentionnerons ici seulement les grandes lignes.

Le corps noir :

Corps qui absorbe tout rayonnement quelle que soit sa fréquence. Un dépôt de noir de fumée sur une surface réalise approximativement un corps noir.

Rayonnement thermique :

Le rayonnement absorbé par un corps noir élève sa température.

Inversement, quel est le rayonnement émis par un corps noir lorsque celui-ci est porté à la température T ? Plus précisément, nous voulons déterminer la quantité d'énergie émise dans un intervalle de fréquences (intervalle $d\nu$ autour d'une fréquence ν) par unité de surface du corps noir en fonction de la température T et de la fréquence ν .

Max Planck, prix Nobel de physique 1918 (existence d'un incrément – quantum – d'énergie minimum, émission par valeurs discrètes du rayonnement électromagnétique, mécanique quantique en physique), découvre la loi spectrale du rayonnement d'un corps noir (loi de Planck) en 1900 et la publie en 1901.

Loi de Planck (relation de Planck-Einstein), lien entre l'énergie d'un photon et sa fréquence :

$$E = h \cdot \nu$$

h : constante de Planck ; $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ [J} \cdot \text{s]}$

ν : fréquence de rayonnement électromagnétique

Albert Einstein, en 1905, relie l'incrément d'énergie minimum (découvert par Max Planck) à un quantum de l'onde électromagnétique elle-même que l'on va dénommer photon, prix Nobel de physique 1921.

Formule de Planck :

Cette formule exprime la densité spectrale énergétique : quantité d'énergie émise par intervalle de fréquence $d\nu$ autour d'une fréquence ν et par unité de volume.

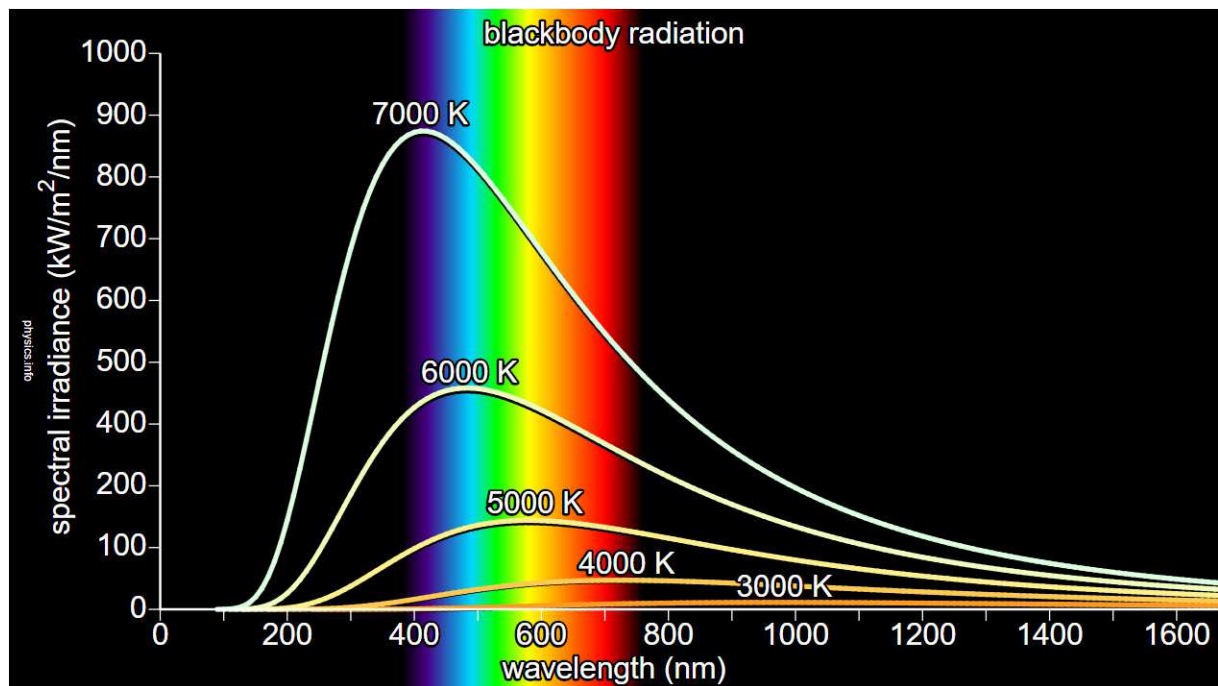


Fig. 2 : Intensité du spectre électromagnétique, c'est-à-dire la densité spectrale d'énergie (*spectral irradiance*) émise par un corps noir en fonction de la longueur d'onde (*Wavelength*) pour des corps noirs à différentes températures de surface, illustration de la loi de Planck. Les domaines des fréquences élevées (petites longueurs d'onde) comme les rayonnements UV, X et Gamma sont vers la gauche de la figure. Les rayonnements de fréquences plus faibles (grandes longueurs d'onde) comme les rayonnements Infra-Rouge et ondes radio se situent vers la droite de la figure. Sources : Hypertextbook.com/Physics, Black Body Radiation ; Observatoire de Paris : Des rayons X à la Radio.

Loi du déplacement de Wien (1896) :

La longueur d'onde à laquelle un corps noir émet le plus de flux lumineux énergétique est inversement proportionnel à sa température. La loi de Wien décrit la relation liant la longueur d'onde λ_{max} correspondant au pic d'émission lumineuse du corps noir, et la température absolue T . Il en découle que plus un objet est chaud, plus la longueur d'onde du rayonnement émis le plus intensément est courte. Par exemple, les étoiles les plus chaudes nous apparaissent bleutées, celles qui sont plus froides nous apparaissent rougeâtres. La loi de Wien de 1896 a été améliorée par Planck en 1900.

Voici enfin la plus belle, la plus simple, la plus complète et qui englobe tout ce qui a été décrit ci-dessus :

Loi de Stefan (1879) – Boltzmann (1884) :

La loi de Stefan (physicien slovène) donne l'émission totale d'énergie d'un corps noir par unité de surface en tenant compte de toutes les longueurs d'ondes du rayonnement qui est émis.

$$E = \sigma \cdot T^4$$

E : énergie totale émise (émittance du rayonnement du corps noir) $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$

σ : constante de Stefan $\sigma = 5,6698 \cdot 10^{-8} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}]$

T : température absolue en Kelvin $[\text{K}]$

La constante de Stefan intègre plusieurs constantes :

- k_B : constante de Boltzmann
- h : constante de Planck
- c : vitesse de la lumière dans le vide

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15c^2 h^3}$$

Le filament d'un tube d'émission n'est pas un corps noir parfait. On introduit dès lors le concept du corps gris. Comme le gris est une notion assez relative, il faut bien introduire un nouveau paramètre : l'émissivité du corps gris (ε) qui a une valeur toujours inférieure à 1. L'émissivité est le rapport entre l'énergie émise par le corps gris en question et celle émise par un corps noir à la même température.

Loi de Stefan pour un corps gris :

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

ε : émissivité du corps gris ($\varepsilon < 1$)

On peut relever l'émissivité d'un filament de tungstène sur la totalité du spectre en fonction de la température.

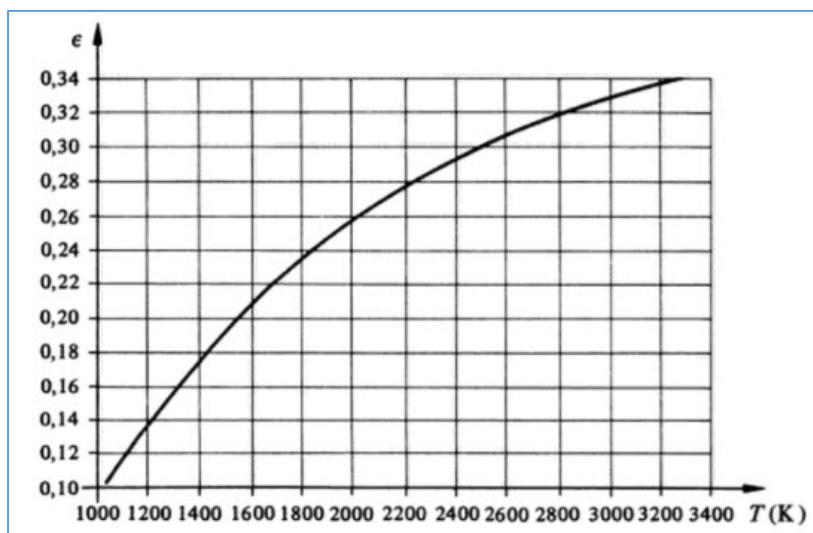


Fig. 3 : Émissivité du tungstène en fonction de la température. Source : Systèmes de mesure (T.E. Vol.17), Pierre André Paratte et Philippe Robert, Presses polytechniques et universitaires romandes.

Tout cela pour ça :

L'énergie électrique absorbée par le filament est transformée en une quantité de chaleur (loi de Joule, loi de puissance) et est dissipée dans le vide par rayonnement électromagnétique et par quanta (loi de Planck, Einstein, et loi de Stefan-Boltzmann). Ainsi, le filament dans un tube à vide atteint une température d'équilibre qui est uniquement fonction de sa tension d'alimentation (d'une manière plus générale : en fonction de la puissance absorbée par le filament). On arrive ainsi à une relation qui peut surprendre par sa simplicité :

$$U \cdot I = \sigma \cdot T^4$$

Cette relation résume tout ce qui se passe au point de vue thermodynamique pour le filament d'un tube d'émission radio. Cela valait le détour.

Fini la théorie, et place à la technologie.

Les deux principaux types de cathode :

- à chauffage indirect (substrat de Nickel recouvert d'oxydes de Baryum et de Strontium) ;
- à chauffage direct (filament de Tungstène avec un ajout de Thorium).

Les cathodes à chauffage indirect sont constituées d'un fourreau isolant réfractaire qui entoure un filament en Nichrome (alliage composé de 80 % de Nickel et de 20 % de Chrome). Le fourreau est en contact thermique avec un tube de Nickel sur lequel a été vaporisé un alliage d'oxyde de Baryum (60 %) et de Strontium (40%). Cet alliage d'oxydes a la particularité d'avoir un très faible travail de sortie (loi de Richardson). Ainsi, la température de la cathode peut être fixée à une valeur de l'ordre de 1000 Kelvins. Dans ces conditions de température, ce type de cathode est capable de délivrer en service continu une densité de courant de 200 mA à 300 mA par cm² de surface de la cathode et en régime impulsif de 1 A à 3 A par cm². Cette haute aptitude d'émission en courant cathodique pour chaque Watt de puissance de chauffage à partir d'un filament est un des principaux avantages des cathodes à oxydes. Les autres avantages sont, entre autres, une basse température de fonctionnement (1000 K) et une grande robustesse mécanique par rapport à d'autres types de construction de cathodes.

Les cathodes à oxydes sont sujettes à une détérioration potentielle à cause d'un bombardement d'ions positifs accélérés par l'anode. C'est la raison pour laquelle les tubes équipés de ce type de cathode sont exploités avec une haute tension d'anode relativement faible. Les performances émissives de la cathode permettent toutefois d'obtenir un courant anodique élevé à ces faibles tensions anodiques.

Les oxydes qui recouvrent la cathode vont s'évaporer lentement (par sublimation dans le vide) pendant la durée de vie du tube ; ces oxydes vont migrer dans le tube et parfois contaminer d'autres électrodes. Cette évaporation peut être minimisée en utilisant des cathodes à haut rendement que l'on fait fonctionner à des faibles températures.

Une cathode à oxydes qui est surchauffée par une tension filament excessive ne va donner que très peu de gain en émissivité mais en revanche va écourter drastiquement la durée de vie du tube : les oxydes de la cathode vont s'évaporer trop rapidement.

Une cathode à oxydes qui est chauffée à une température trop basse risque de subir une dégradation chimique que l'on nomme empoisonnement de la cathode. À trop basse température, une cathode ne peut empêcher un certain taux d'absorption de gaz qui l'empoisonne et qui réduit à tel point son émission qu'un phénomène d'étincelage peut survenir et détruire irrémédiablement cette cathode. Dans ces conditions défavorables, la cathode peut induire localement un arc électrique qui produit un échappement de gaz. Ce gaz, une fois ionisé, précipite un arc électrique directement entre l'anode et la cathode dont on peut imaginer les effets d'endommagements irréversibles pour le tube d'émission.

On peut mieux comprendre à présent la raison pour laquelle les constructeurs des tubes d'émission recommandent une tension précise d'alimentation du filament, et cela dans des tolérances assez serrées.

Les cathodes à chauffage direct pour les tubes d'émission sont pour la majorité constituées d'un filament de Tungstène avec un ajout de Thorium. Lors de la fabrication du fil de Tungstène, 1,5 % de Thorium est ajouté sous forme d'oxyde (ThO_2). Lorsque le vide est créé dans le tube, un procédé bien spécifique de fabrication de ces tubes permet de faire migrer du Thorium sous sa forme métallique vers la surface du fil de Tungstène formant le filament. L'émissivité du filament augmente ainsi d'un facteur 1000. Le filament subit aussi un procédé de cémentation. La faible quantité de carbure de Tungstène qui est formée sur le filament a pour effet de réduire le taux d'évaporation du Thorium et augmente ainsi considérablement la durée de vie du filament. La température de fonctionnement de ce type de filament est de l'ordre de 1900 Kelvins. On arrive ainsi à une densité de courant de la cathode à une valeur de 500 mA par cm^2 .

Les cathodes à chauffage direct composées de filament en Tungstène-Thorium sont beaucoup plus tolérantes aux bombardements d'ions positifs que les cathodes à oxydes. C'est la raison pour laquelle l'anode peut être portée à des hautes tensions de valeurs plus élevées que celles qui sont admises pour les tubes aux cathodes à oxydes.

Les filaments des cathodes à chauffage direct doivent être alimentés sous une tension d'alimentation stricte comme ceux des cathodes à oxydes. Un filament en Tungstène-Thorium cémenté a tendance à perdre progressivement sa cémentation au cours de la durée de vie du tube. Si un filament perd sa cémentation, la couche atomique de Thorium à la surface du filament se libère par évaporation et la cathode perd ses propriétés d'émissivité d'électrons. Si un filament est surchauffé par une tension d'alimentation trop élevée, le phénomène de perte de cémentation est accéléré. La durée de vie du tube est en conséquence écourtée à cause de la perte de cémentation du filament.

Sous-alimenter un filament de cathode à chauffage direct est tout aussi nuisible pour la durée de vie du tube : un filament trop froid (trop peu chaud) agit comme un piège à gaz (*getter* : « attracteur ») qui attire les éléments contaminants présents dans le tube. Lorsqu'un élément contaminant vient se fixer à la surface du filament, la surface affectée devient inopérante provoquant ainsi une chute des propriétés émissives de la cathode. On appelle ce phénomène « empoisonnement » de la cathode.

Nous sommes à présent en connaissance de cause de l'importance d'alimenter le filament d'un tube d'émission radio à la tension nominale bien précise recommandée par le constructeur et en outre de prendre toutes les mesures conservatoires afin de maintenir la valeur de la tension filament dans les tolérances assez serrées qui sont aussi recommandées par le constructeur du tube.

Passons à la pratique !

Voici l'exemple d'un OM passionné de DX en ondes courtes et qui utilise un linéaire à tube tétrode avec une large réserve de puissance pour pouvoir faire fonctionner cet amplificateur sous un régime proche du service continu car cet OM utilise souvent des modes de modulations numériques. Le linéaire est donc bien plus sollicité qu'en modulation SSB. La réserve de puissance du linéaire permet une utilisation dans le cadre de la licence et des autorisations détenue par l'OM sans devoir pousser le linéaire aux limites de la puissance maximale pour lequel il est prévu. Le linéaire est donc construit avec un très gros tube d'émission dont il va falloir trouver une solution d'alimentation précise et stable pour la tension filament. L'OM réside dans un quartier où de nombreuses installations de panneaux photovoltaïques sont implantées chez des particuliers du voisinage. Le linéaire a été prévu à l'origine pour une tension nominale du réseau de 230 V. Le linéaire ne dispose malheureusement pas de sélecteur de plage de tension réseau pour son utilisation. La plage de tension réelle du réseau a été relevée chez l'OM sur une large période de temps (de plus d'une année). Les statistiques des relevés des tensions réseau donnent deux valeurs extrêmes : au minimum 228 V et au maximum 243V. On a donc une tolérance de tension réseau maximale critique et trop élevée de 5,65 %. Les tubes d'émission tolèrent en général des tolérances de +3 % et de -3 % par rapport à la tension nominale pour l'alimentation du filament. Il faut donc agir et trouver une solution pour cet OM.

Le tube d'émission est une tétrode GU78B. Les caractéristiques de tension filament sont les suivantes :

- Cathode : chauffage indirect, cathode à oxydes ;
- Tension filament AC ou DC : 27 V ;
- Courant filament : de 3,4 A à 4 A ;
- Valeurs limites de fonctionnement pour la tension filament : de 25,5 V à 28,3 V.

Comme le secondaire transfo pour le filament a été calibré à une tension secondaire nominale de 27 V pour une tension réseau nominale de 230 V, on constate rapidement que sous une tension réseau de 243 V, le secondaire transfo délivre une tension de 28,5 V qui est une tension qui outrepassa la valeur maximale admissible recommandée par le constructeur du tube d'émission.

Comme le tube est constitué d'une cathode à oxydes, à chauffage indirect, et que le constructeur mentionne explicitement que l'on peut alimenter le filament du tube GU78B indistinctement avec du courant alternatif ou avec du courant continu, la solution de mettre en œuvre une alimentation électronique régulée à courant continu s'impose d'office comme étant la solution la plus simple et la plus rationnelle. Nous devons donc sélectionner une alimentation 27 V et dont la puissance en service continu puisse être au minimum de 100 W : si on prend une valeur moyenne de courant filament de 3,7 A on obtient une puissance moyenne de $27\text{ V} \times 3,7\text{ A} = 100\text{ W}$.

Après un rapide tour d'horizon sur ce qui existe sur le marché en matière d'alimentation à intégrer dans un appareil électronique (solution « OEM » d'un équipementier), nous avons trouvé une alimentation électronique capable de fournir une tension régulée et pouvant être réglée à une valeur de 27V_{DC} tout en étant capable de délivrer un courant de 7,5 A (puissance de 200 W). Une alimentation de ce dimensionnement pourra nous garantir une réserve de puissance suffisante pour être utilisée en service continu sous une charge nominale permanente et sans être sollicitée à ses valeurs limites de fonctionnement.

Quelle est la caractéristique de performance qui doit principalement attirer notre attention pour le choix d'une alimentation régulée dans le cadre de notre application ?

Il s'agit évidemment de la plage de tension d'entrée pour laquelle l'alimentation garantit une tension de sortie parfaitement régulée (*Line Regulation*).

L'alimentation choisie provient du constructeur Mean Well, modèle RSP-200-27. La plage de tension d'entrée est comprise entre 88 V_{AC} et 264 V_{AC}. C'est plus qu'il n'en faut ! En outre, cette alimentation garantit une tension de sortie dans des tolérances de $\pm 0,2\%$ dans la totalité de la plage de tension d'entrée ! C'est exactement la caractéristique principale que nous recherchions. Les caractéristiques de chute de tension de sortie en fonction des variations de charge ne sont pas critiques : la charge est constante (filament alimenté en permanence sans variation de courant). Les caractéristiques d'ondulations résiduelles ne sont pas critiques non plus : le filament peut être alimenté en courant alternatif, ce qui est bien la preuve que la cathode a une inertie thermique suffisante pour être insensible aux ondulations de tension. Ce qui compte, c'est que la résultante AC + DC de la tension efficace vraie (*True RMS*) soit précise et stable.

Le secondaire transfo de l'alimentation filament d'origine a été déconnecté et les extrémités de celui-ci ont été isolées avec précautions. L'alimentation Mean Well substitue à présent le secondaire transfo. Le boîtier de l'alimentation a été fixé sur l'extérieur de la face arrière du linéaire. Des traversées de câbles ont été aménagées afin de raccorder l'entrée et la sortie de l'alimentation régulée.



Fig. 4 : Alimentation régulée 27 V_{dc} 7,5 A (200 W) Mean Well RSP-200-27.

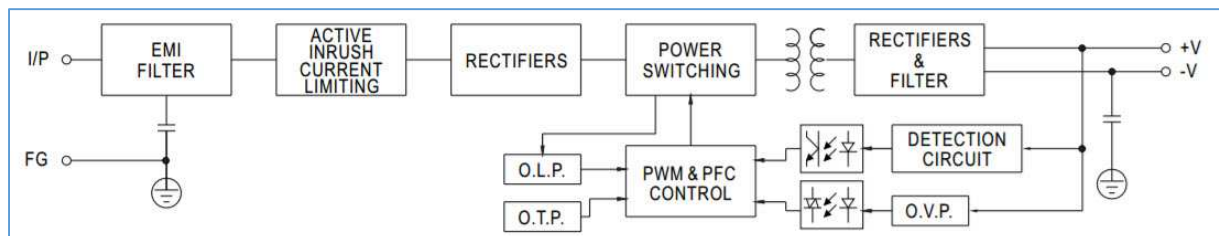


Fig. 5 : Schéma-bloc de l'alimentation illustrée ci-dessus.

L'alimentation régulée dispose d'un réglage fin de la tension de sortie par l'intermédiaire d'une résistance ajustable (*Trimpot*). Le réflexe immédiat a été de placer l'alimentation sur un banc de test pour l'éprouver et pour régler définitivement la tension de sortie dans les mêmes conditions de charge dans laquelle elle se retrouvera en alimentant le filament du tube d'émission.

Un détail pratique a son importance : il s'agit des connexions à la sortie de l'alimentation. Toutes les précautions doivent être prises pour diminuer autant que possible les résistances des connexions et celles des fils de raccordement. Comme il s'agit d'une très basse tension sous un courant relativement élevé, la moindre résistance de contact ou de ligne provoque une chute de tension non négligeable.

Le bornier de l'alimentation choisie est bien conçu car il est équipé de plusieurs bornes de sorties en parallèle pour chaque potentiel : trois bornes par pôle. Le réflexe pratique a été de raccorder chaque borne de sortie par un fil de câblage d'une section de $2,5 \text{ mm}^2$ avec des cosses appropriées : chaque résistance de contact est mise en parallèle diminuant ainsi du même facteur la résistance globale de contact aux bornes de l'alimentation. Ensuite, les trois connexions en fil de $2,5 \text{ mm}^2$ sont mises en commun par une épissure brasée (soudée) sur un fil de câblage d'une section de 6 mm^2 . Cela peut paraître de prime abord excessif, mais cela s'avère en pratique nécessaire pour limiter au maximum les chutes de tension dans les lignes de raccordement. Une alternative de solution consiste à réaliser un câblage avec une sonde de tension (*Voltage Sense*) pour que l'alimentation puisse compenser la chute de tension si celle-ci est équipée d'un tel dispositif. C'est à vous de voir ce que vous préférez choisir comme solution technologique.

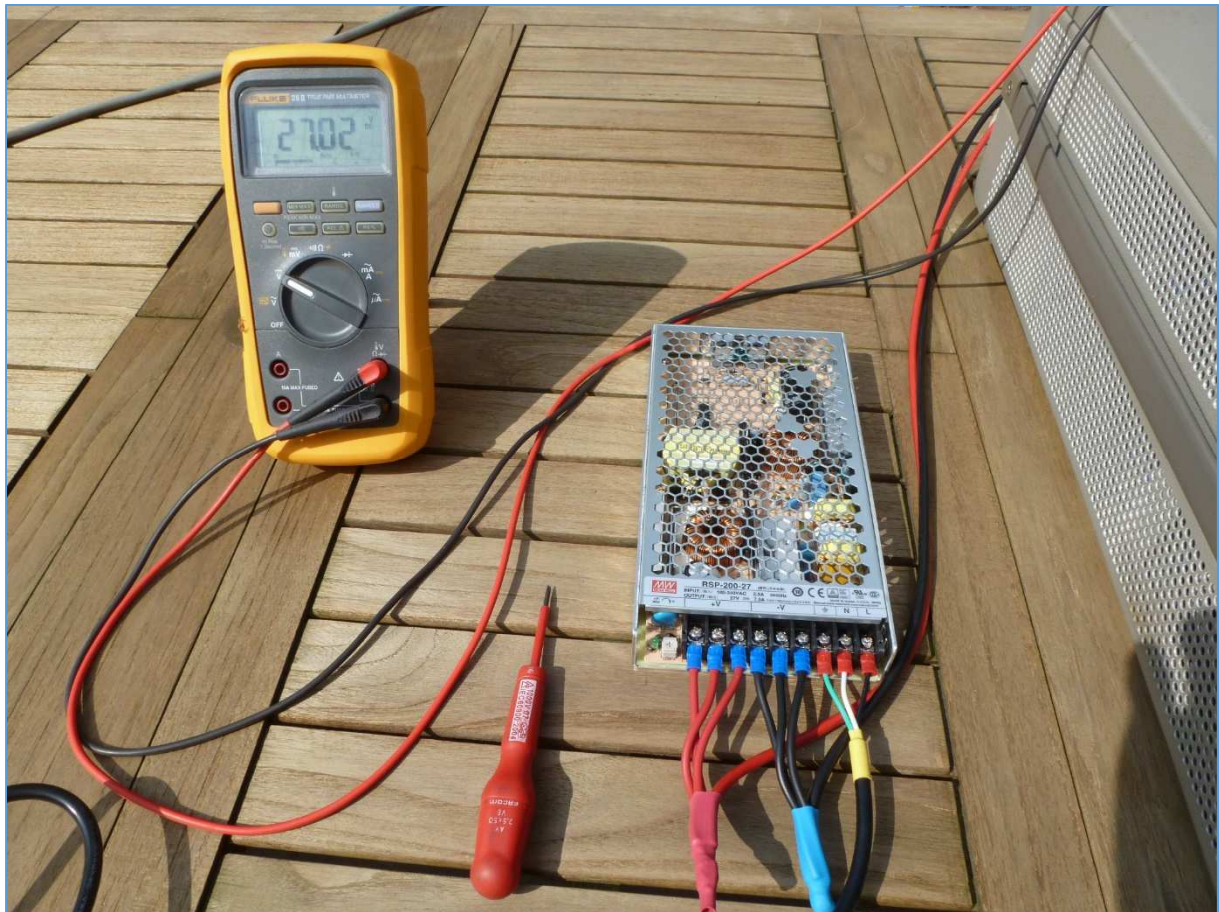


Fig. 6 : Raccordement des lignes de connexion sur l'alimentation régulée. On peut y observer la mise en parallèle de plusieurs fils de câblage sur chaque pôle afin de diminuer la résistance de contact globale à la sortie basse tension. Le réglage fin de tension est effectué pour obtenir aux extrémités des fils de câblage une tension nominale précise de 27 V en charge sous un courant nominal de 4 A.



Fig. 7 : Banc de test de l'alimentation en charge au moyen d'une charge électronique HP 6050A.

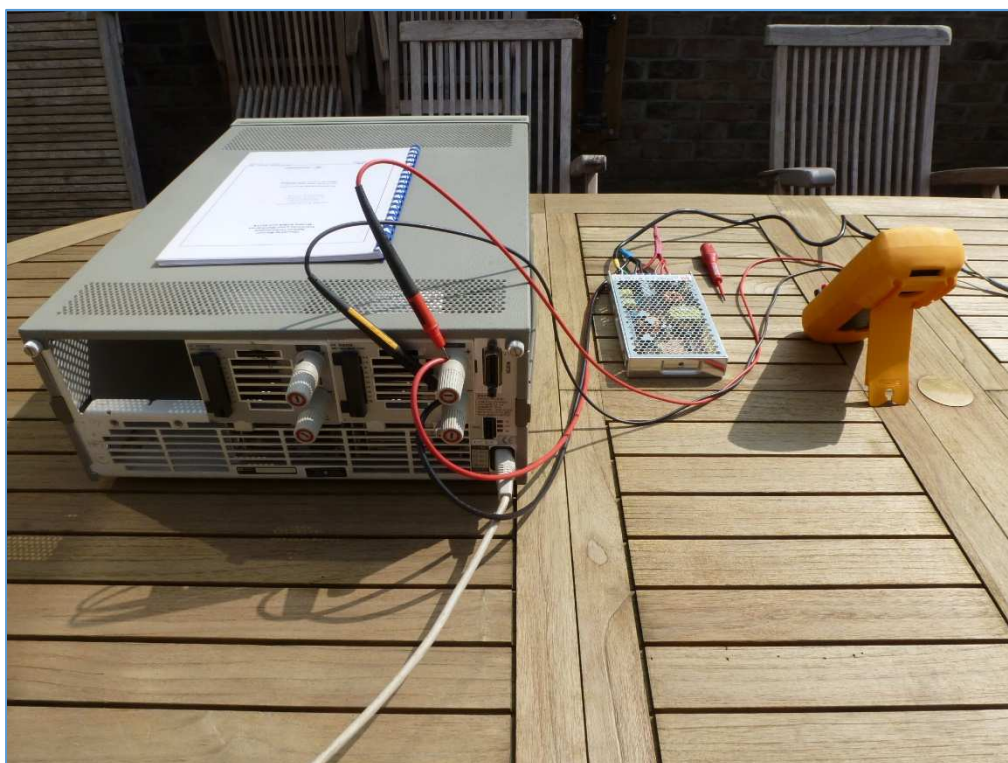


Fig. 8 : Banc de test de l'alimentation en charge. La mesure de tension est contrôlée avec un multimètre de précision qui a été récemment calibré dans un laboratoire de mesure. La mesure de tension est effectuée aux extrémités des lignes de connexion basse tension directement aux bornes de la charge électronique.

Voici une vue d'ensemble de l'intégration de l'alimentation régulée fixée à l'arrière du boîtier du linéaire de notre OM. Les passages de fils de câblage à travers le panneau arrière du linéaire ont été effectués par des presse-étoupes en plastique. L'épaisseur conséquente de tôle de panneau arrière ne pouvait permettre l'insertion de passe-fils en caoutchouc.

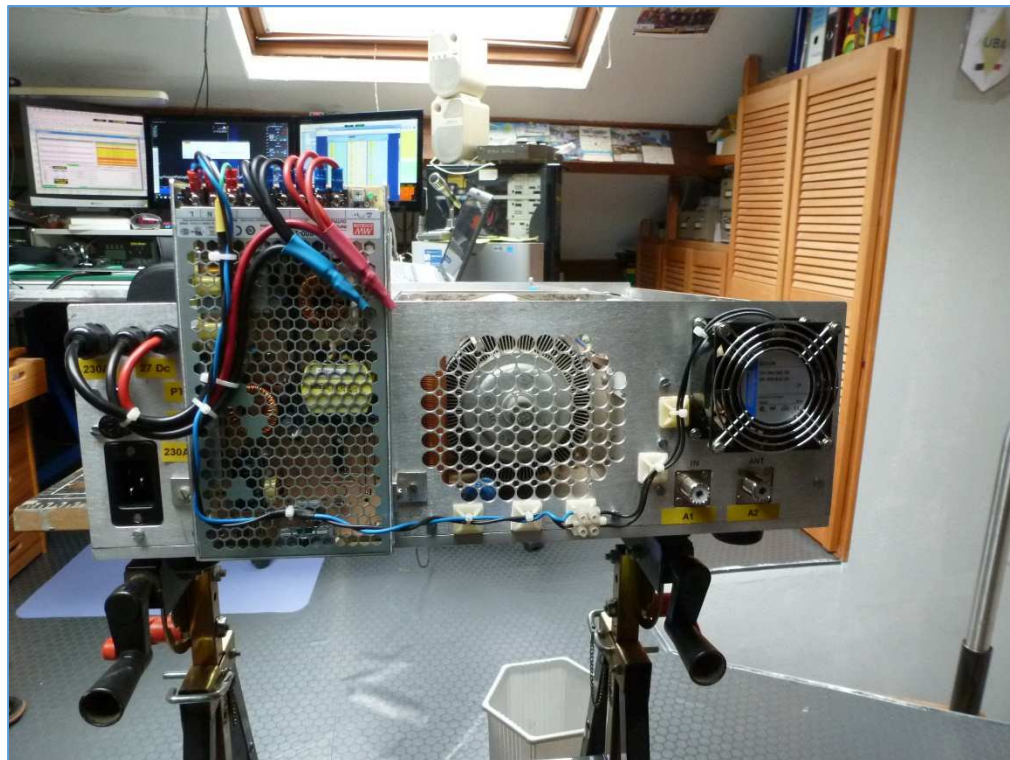


Fig. 9 : Intégration d'une alimentation régulée pour l'alimentation filament d'un tube d'émission d'un linéaire de puissance. On peut observer l'anode du tube d'émission et ses ailettes de refroidissement au travers des trous d'aération au centre du panneau arrière du linéaire. Un ventilateur auxiliaire a été rajouté par l'OM pour refroidir la cavité contenant le circuit de couplage de sortie du linéaire (bobines et condensateurs variables « *Tuning* » et « *Loading* » du circuit « PI » (circuit Jones) de sortie HF.



Fig. 10 : Vue d'ensemble du linéaire : circuit de sortie, transfo, alimentation, tube, turbine, etc.

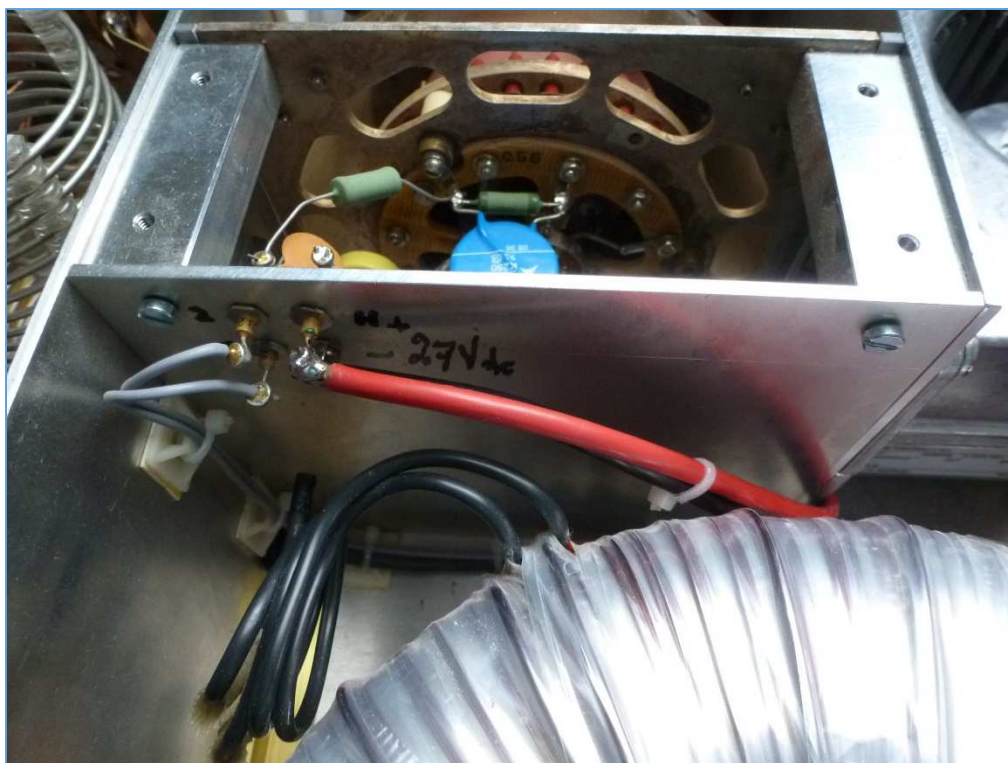


Fig. 11 : Détail des connexions de l'alimentation régulée (fil rouge et fil noir juste en dessous) pour le filament à l'entrée des condensateurs de traversée (*By-pass*) vers la cavité du circuit d'entrée HF du tube d'émission au niveau du soquet du tube. On observe à l'avant plan les sorties du secondaire transfo (fils noirs repliés) pour l'alimentation d'origine du filament. Le secondaire transfo a été déconnecté et ses extrémités ont été isolées avec précaution.

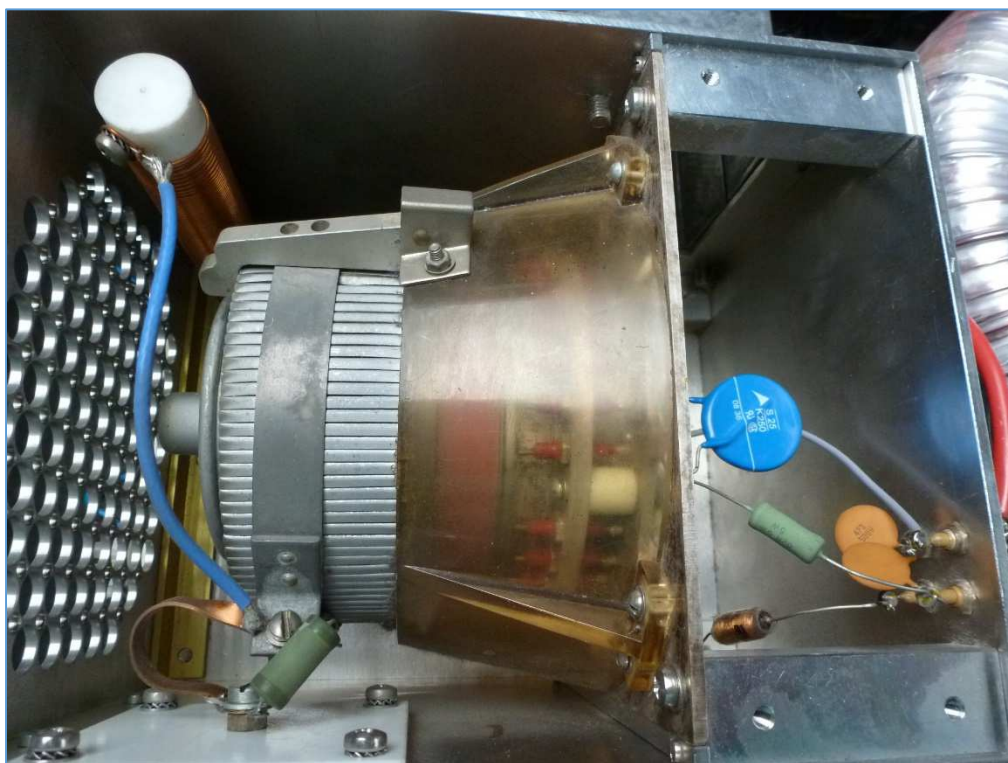


Fig. 12 : Tube tétrode d'émission GU78B. On peut observer la cheminée de refroidissement de l'anode au travers de laquelle sont visibles les nombreux condensateurs de découplage de la grille écran.



Fig. 13 : Vue de l'arrière du linéaire avec intégration d'une alimentation régulée de la tension filament.

Si vous devez un jour réaliser la transformation d'un appareil radioamateur à tube d'émission dont la cathode est à chauffage direct et qui nécessite une tension régulée en courant alternatif, n'oubliez pas de mesurer avec précision la tension filament directement aux bornes du tube et impérativement au moyen d'un multimètre *True RMS* (tension efficace vraie). Votre multimètre doit avoir été calibré à partir d'une référence irréprochable. Soyez conscient que la tension filament doit être mesurée au dixième de volt près, voire à quelques centièmes de Volt !

Souvenez-vous de la définition d'une tension efficace vraie. Un stabilisateur de tension alternative et un transformateur peuvent rajouter de la distorsion sur la tension sinusoïdale du réseau. Un multimètre basique mesurera une tension moyenne redressée et convertie en tension efficace par un facteur fixe sans tenir compte des distorsions de la sinusoïde de la tension à mesurer. Pour mieux comprendre les raisons essentielles des mesures *True RMS* d'une tension filament, je vous invite à relire la fin de l'article « La composition de signaux et la mesure de valeurs de tensions RMS » qui a été publié sur le site Internet ON5VL.

Conclusions :

Cet article a pour but de vous sensibiliser sur l'importance de la tension filament d'un tube d'émission pour un appareil radiofréquence destiné à l'usage des radioamateurs.

Une bonne gestion de la tension filament de votre tube d'émission vous assurera à l'avenir une bonne longévité de votre appareil radiofréquence radioamateur.