



# UN PA 144 MHz TRÈS QRO

F1AFJ, Jean-Pierre MÉRÉ

Depuis que je me suis remis à l'EME, j'avais envie de faire un gros PA, pour ne plus recevoir seulement des "QRZ ?" des stations auxquelles je répondais !

## HISTORIQUE :

Donc au printemps 2003 je me suis mis en quête du matériel dont j'avais besoin. Dans le cercle de mes amis j'ai trouvé des tubes "TH215" Thomson. Après une recherche des caractéristiques, ils correspondaient aux "4CX1500b" de Eimac. Je me suis donc mis à la recherche de descriptions autour de ce tube. Je me suis lancé dans une longue réflexion pour faire une "synthèse" de tout ce que j'avais trouvé ! J'ai fait des plans et des schémas, j'ai réuni le matériel qui me manquait. Quand tout a été rassemblé, je me suis lancé dans la construction, à l'automne 2003 ! J'ai percé, plié, ajusté, câblé... Et un jour il a bien fallu "mettre le feu dedans !". Les essais préliminaires se sont passés sans réels problèmes, le courant de repos du tube réglé, un peu de HF à l'entrée pour faire les accords, et hop ! quelques centaines de watts à la sortie ! Oh la la ! Bien trop facile ! Me suis-je dit... Les vrais ennuis ont commencé dès que j'ai voulu passer à la puissance supérieure : j'ai fait du "barbecue" avec les feuilles de téflon. Le problème était que je faisais un accord à haute impédance donc à tension HF élevée. J'ai revu ma copie en changeant de CV (+ de capa et - de self) : plus de problème d'isolement. Mais là, le tube avait un rendement désastreux, moins de 40%. Après "moult" essais, 2 châssis et 3 types de circuit de sortie différents, il a bien fallu que je me rende à l'évidence : le tube

"Thomson" ne marchait pas comme un "Eimac" même si du côté des caractéristiques ils sont identiques ! Il faut quand même dire que ce tube n'est pas fait pour les VHF, il ne monte qu'à 60 MHz, sur le papier ! Mais comme certains OM l'ont fait fonctionner sur 144 MHz, pourquoi pas moi ? (eux, ils l'ont fait avec des tubes "Eimac"). Depuis, j'ai discuté avec plusieurs OM (F6HPP, F6ETI) qui ont dit être au courant de ce fait ! Au début de l'hiver, je me suis mis à la recherche d'un autre tube. J'ai trouvé le GS23b qui est bien plus performant dans les mêmes dimensions. Je me suis remis au travail, un nouveau châssis, fabrication du support en strip-line, d'une cheminée en téflon, modification de l'alimentation des G1 / G2. La "formation" du tube a duré deux jours (pour info, le courant de fuite de G1+G2+K à la masse, après formation, est de 2,5 mA sous 700 V). La mise en route a suivi, le réglage du courant de repos a été fait avec une tension g2 de -32 V (bien plus basse que je l'avais prévue), à ce moment le courant d'anode est de 200 mA.

J'ai laissé tourner le PA sur le courant de repos pendant 1 heure pour voir sa stabilité (il n'a pas bougé de 10 mA). J'ai donc lancé la procédure de réglage, et là, "Pouf !" plus rien ! (Aïe, me suis-je dit !). Recherche de la panne, plus de tension sur l'écran (ouf !). En allant plus avant, je trouve le transistor de régulation QRT

(BUX81). Pourquoi est-il "cassé" ? Après réflexion, normal ! Avec un VCE de 500 V sur 490 V, il aurait été anormal qu'il tienne ! Je l'ai remplacé par un BU208 qui a un VCE de 1500 V, et tout est reparti ! J'ai lancé les essais en HF, accord de cathode OK ! Accord d'anode en butée ! Et redémontage du capot (20 vis ! J'ai l'habitude !) : la capa est au max, donc il manque de la self. Re-modification, re-essai, re-modification, re-essai ... pour en arriver aux résultats du tableau.

## Le projet d'une GS23b avec circuit d'anode à strip-line TECHNIQUE :

Pourquoi une tétrode ? Pour son gain en puissance ! J'explique : 25/30 watts pour 1000 watts et 30/35 watts pour 1500 watts de sortie. Oui, me direz-vous, 100 watts pour 1300/1500 watts avec une triode ! Sachant que les transceivers modernes sortent tous 100 watts, pourquoi se compliquer la vie avec une tétrode ? Voilà la raison qui a fait que je suis parti avec une tétrode : un transceiver actuel a un IP largement meilleur à 35 watts qu'à 100 watts !

technique

GS23b circuit à self + capa

Drive power – W	30	35	60
Output power – W	900	1000	1200
Gain – dB	14,8	14,6	13,0
Ua (idle) – V	3050	3050	3050
Ua (max Ip) – V	2950	2900	2850
Ia (idle) – mA	120	120	120
Ia (max) – mA	450	520	720
Pinp – W	1327	1508	2052
Pdiss – W	427	508	852
PI eff - %	68	66	58
Ug1 – V	-33	-33	-33
Ig1 – mA	0	0	4
Ug2 – V	480	480	480
Ig2 – mA	2	3	12

## Commentaires sur les résultats

Bien en dessous de ce que je me suis fixé... Je pense qu'avec le type de circuit utilisé je manque de capa. Mais faire une modification pour changer les CV, je n'en ai pas trop envie ! Quitte à changer, je vais faire un circuit à ligne (Oui, oui ! Il n'y a que les imbéciles et les idiots qui ne changent pas d'avis...). Je suis reparti sur un nouveau projet, à strip-line cette fois.

Donc comme l'ampli qui le suit, à triode ou à tétrode, amène une dégradation de l'IP quasi équivalente, cela fait qu'à la sortie de l'ampli le signal a un meilleur IP avec une tétrode. Une tétrode est fragile ? J'ai vu dans la littérature des "usines à gaz" pour sécuriser un PA à tétrode. Que faut-il pour protéger une tétrode ? Une tempo pour la cathode, un détecteur de courant à seuil deux sens ▶

# technique

pour l'écran (G2), et un détecteur à seuil pour la drive, un point c'est tout ! Un détecteur de pression d'air, comme sur tout ampli refroidi par air. Explication : le "talon d'Achille" de la tétrode est la grille écran (G2) qui risque de fondre, car elle ne dissipe que quelques watts. Les raisons qui font que le courant d'écran monte sont : rupture de l'alimentation d'anode (l'écran devient anode), trop d'excitation de la grille de commande (il y a risque de la fondre aussi). Il faut donc pour protéger le tube en limitant le courant d'écran (dans les deux sens : alimentation vers écran et écran vers alimentation). Pour la grille de commande (G1), pas besoin de détecteur de courant, juste une détection de la HF à l'entrée de l'ampli (juste une diode, une capa, un potentiomètre) comme un ALC. De grâce, surtout pas d'ALC vers le transceiver ! (À mon avis il n'y a pas de pire chose que cela !). La cathode est protégée par une simple tempo qui autorise le fonctionnement du tube après quelques minutes de chauffage.

Le circuit d'anode : après les déboires avec les circuits à self, j'ai fait une strip-line téflon / alu en quart d'onde (voir les photos) ; je ferai des essais avec du téflon / cuivre plus tard. La simulation montre que l'adaptation de l'anode à l'antenne est bonne. Voici cette simulation :

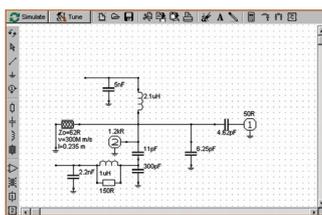
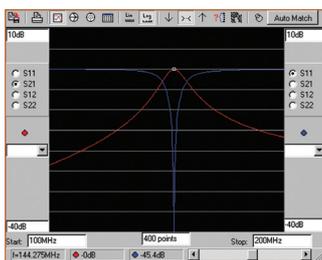
L'impédance de l'anode pour 1500 W et 1900 V de swing est de :

$$(3000 - 1100)2 / (2 \times 1500) = 1200 \text{ ohms environ.}$$

Le circuit cathode : la grille est à la masse, le circuit cathode est classique et n'appelle aucun commentaires.

Les alimentations : de G1/G2 sont de type shunt. J'utilise ce type d'alim. depuis 1978 sur mon PA à 4CX350 et elle n'a jamais failli : une résistance en

série, un transistor en parallèle, quelques diodes Zener, une résistance, une capa et le tour est joué ! À noter : le courant à vide des transistors doit être de 35 mA pour la G2 et de 10 mA pour la G1. Il est nécessaire de bien stabiliser les tensions de polarisation, pour avoir une bonne linéarité de l'ampli de puissance. Pour la haute tension, rien de nouveau ! Du classique...



## ATTENTION, DANGER DE MORT !

3500 volts et 1,5 ampères = CHAISE ELECTRIQUE !!!

La liaison alimentation-ampli doit être sûre et sans ambiguïté (pas de fiches PL, N, BNC, uniquement des fiches adaptées BNC spéciale HT). Attention, bien soigner la continuité des masses pour assurer la sécurité ! (voir schémas 1 et 2).

Préparation du tube : un tube neuf (même d'occasion) a quelquefois été stocké plusieurs années ; il faut donc le "former" ! Pour cela, voilà comment je pratique (cette méthode n'est pas de moi mais je la rappelle !). Etape 1 : juste le filament alimenté (6 volts) pendant 24 heures, une ventilation est nécessaire.

Etape 2 : toujours filament alimenté, les 2 grilles réunies à la cathode et à la masse (0 volt de l'alimentation HT).

Mettre la haute tension sur l'anode (1000/1200 volts à travers 100 kΩ ; pour ma part je mets 3 résistances de 33 kΩ/ 1/2W en série, pour une meilleure protection du tube, en cas d'effluves) et le laisser sous tension 24 heures. Ne pas oublier de ventiler le tube.

Etape 3 : faire les essais du PA avec une tension réduite (2/3 de la tension normale semble être correct), et faire travailler le tube à mi-puissance pendant plusieurs heures, avec la ventilation normale.

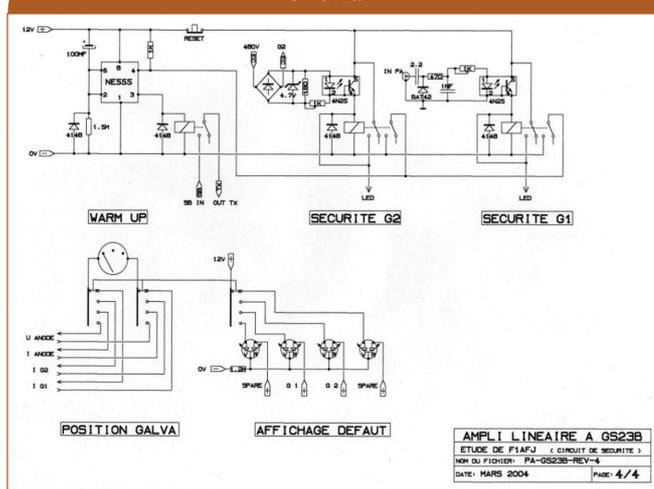
Etape 4 : remettre la HT normale et faire travailler le tube normalement !

Pour la petite histoire : j'ai le tube de mon PA à 4CX350 qui date de 1978 ; il est toujours capable de sortir 550 W sur un tune ! Il a plusieurs centaines d'heures de trafic avec 350/400 watts, il est comme au premier jour ! Ce qui veut dire qu'un tube a besoin de rodage comme un moteur, pour durer !

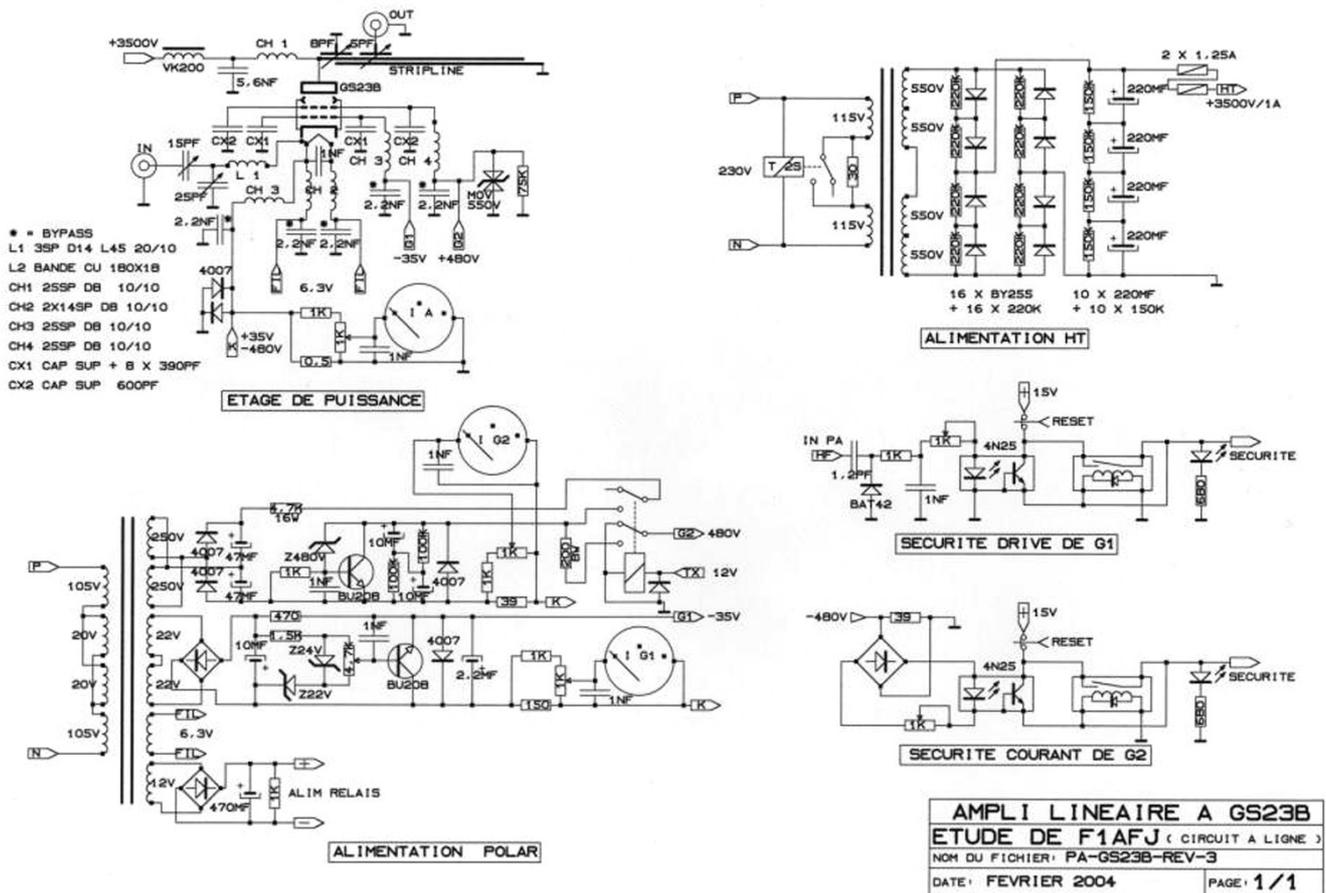
Les essais : pour commencer, enlever le tube et contrôler la tension de polar grille (-50 V), la tension de G2 en émission (480 V en TX et 0 en RX), la HT (si possible. Attention, danger !). Remettre le tube en place, relier la sortie de l'ampli à une charge via un wattmètre, mettre en route et faire chauffer.

Après quelques minutes passer en TX sans drive, régler le courant de repos vers 200 mA. Si vous en êtes arrivé là, c'est que tout va bien ! Maintenant mettre 2/3 watts de drive et régler le circuit de cathode, pour une élévation du courant de repos (vérifier que les réglages ne sont pas en butée). Ensuite, avec les réglages de l'anode, rechercher un creux de courant anode (qui doit correspondre à une déviation du wattmètre) et toujours contrôler que les réglages ne soient pas en butée. Si tout s'est bien passé, vous êtes sur la bonne voie ! Maintenant il faut monter le drive petit à petit, et refaire les réglages chaque fois, en surveillant les courants de G1, G2, anode et en notant les paramètres sur un tableau, pour pouvoir ensuite déterminer le point de fonctionnement du tube. Il ne reste plus qu'à faire le dernier test, qui va consister à établir un tableau du gain en fonction de la puissance d'entrée afin de contrôler la linéarité du PA. Pour ce faire, il faut régler le PA au max de puissance (celle que l'on a déterminée comme point de fonctionnement). Ne plus rien toucher aux réglages. Relever point par point la puissance d'entrée et de sortie.

Shéma 1



## Schémas 2



Sur le tableau, rechercher le point où le gain a chuté de 1 dB. C'est à cette puissance qu'il faudra régler le PA en SSB.

(plutôt moins que plus !!!)

Voilà, si vous avez bien suivi cette méthodologie, vous êtes l'heureux possesseur d'un très bon ampli !

### Compte rendu des essais préliminaires du circuit à ligne

le 04/03/2004

La modification de la ligne d'anode étant terminée, je me suis lancé à faire quelques essais. Le kilowatt a été obtenu sans problème, néanmoins les réglages n'étaient pas d'une grande stabilité ! Mais quand j'ai voulu monter plus haut, les capas additionnelles de décou-

plage d'écran ont explosé ! Je me suis mis à en rechercher les causes, sans trouver de réponse à mes questions.

le 05/03/2004

Ce matin, j'ai continué mes essais ! Après la déroute d'hier avec les capa d'écran, je n'ai gardé en découplage d'écran que le disque du support (environ 300 pF). Comme je l'avais pensé les réglages ont été parfaitement stables. J'ai fait tourner la bête en porteuse avec 1200 W HF pendant ¼ d'heure sans problèmes ! Le rendement est très bon : 62% ! Par contre je l'ai monté à 1500 W et là petite odeur plus petite fumée... À 1500 W le rendement est encore très bon : 56%!

Conclusion, la capa d'écran est

très importante ! Sa réactance doit être beaucoup plus petite que l'ohm, et de très bonne qualité (un Q très élevé !). C'est pourquoi la résistance qui amortit la self de choc a brûlé ! La capa d'écran intervient dans le rendement du circuit d'anode. Je vais modifier ma capa pour doubler sa valeur et comme cela, j'espère que la résistance tiendra...

le 06/03/2004

Modification terminée ! Capa doublée (600 pF). Self en fil plus gros (80/100). Résistance pas en contact avec le fil de la self.

Demain on essaye !

le 09/03/2004

En cette fin de matinée riche en émotions, voici le verdict...

La résistance (comme vous le voyez) est encore brûlée ! (bon ben moi y en a pas savoir pourquoi !) Tant pis pour elle, j'ai laissé en l'état pour voir.

La "bête" a tourné ½ heure avec 1600 watts HF. Jean-Luc, ta charge a vraiment chauffé (pas au point de mettre en route les ventilos, mais je pense qu'elle n'était pas loin des 60°C !). Le rendement, bien que pas exceptionnel (55%), a permis de rester en dessous des 1500 w de dissipation d'anode. Donc je suis bien satisfait des résultats !

le 17/03/2003

A la suite des problèmes de résistances qui fument ! j'ai monté 8 capa céramiques hf de 330 pF/1000 V en // sur la capa

# technique

disque de l'écran . J'ai fait les essais ( les réglage ont un peu changé , donc ça a fait quelque chose !... ) les résultats sont identiques sauf que le courant d'écran a un peu baissé comme le tableau le montre ! puissance max sur un temps long ! plus de fumée !... ( je pense que les capa que j'avais mis au départ étaient de mauvaise qualité HF )

## Essais en BLU

Je me suis livré à des nouveaux essais ! cette fois en SSB. Je le savais déjà mais il faut encore le dire ! attention à ne pas sur exciter un ampli en régime linéaire ! les photo en disent long ! elles sont prises avec 1500 W crête c'est à dire juste avant le point de compression à 1dB , sauf la première de l'analyseur qui est 25 W crête ( l' IC-746 seul ) Si vous regardez les wattmètres, on est loin du compte !..... et pourtant le barregraphe du 746 monte à la même hauteur que sur un coup de sifflet (il indique une valeur crête) le premier Bird (43) indique 11 W le second Bird (4431) indique 600 W et le coupleur directif EME indique 700 W ,alors que sur un coup de sifflet ils indiquent 27 W et 1500 W !..... Ils faut donc ne jamais faire confiance au Wattmètre pour régler un émetteur et son PA , la différence de lecture entre le coupleur et le 4431 explique par la différence d'intégration du galva ( le cadre est plus ou moins amorti ) Les conditions de modulation du TX sont en régime 2 tons (700 et 1900 hz) On peut voir que le PA ne modifie pas le signal ( ou si peu !) malgré les 1500 W crête ! Conclusion : il n'y pas d'autre méthode que le deux tons et un oscilo (pas besoin qu'il soit performant un BF suffit avec une sonde de détection) pour régler un TX et son PA ! Ce n'est pas pour rien que les

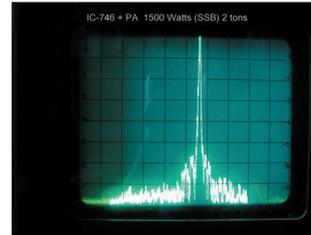
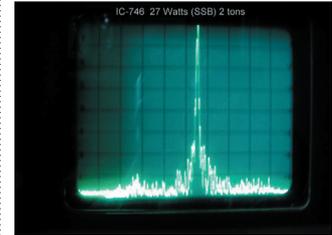
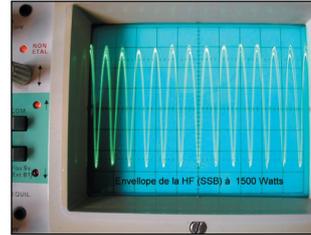
Pro Américains (eh !! oui encore eux) utilisent cette méthode depuis les années 60 !!!! Mais c'est vrai nous les "Frenchy" et les habitants du vieux continent, nous sommes plus "malins" avec notre sifflet à deux tons et notre "43 (Bird) à intégration crête !!... " pour régler nos TX et leurs PA ( il n'y a qu'à écouter les bandes ! ) c'est sur cette note d'humour (noir) je vais terminer mes essais !

## Ligne en cuivre rouge

A la suite de tout cela, il me restait un essai à faire pour satisfaire ma curiosité ! Faire une ligne en CU, ce qui a été fait au mois d'avril (non, pas le poisson!). Après avoir réalisé la ligne, les essais ont été menés comme suit.

## Les essais

J'ai bien vu que le rendement était meilleur, mais à la vue du tableau je suis tombé sur les fesses !à tel point que j'ai refait



mes essais ! J'ai contrôlé le calibrage de l'appareil de mesure du PA !

J'ai même été chercher un autre bouchon Bird 1000C chez un OM pour contrôler la chaîne de mesure de puissance ! A 1000 W le milliwattmètre est en harmonie avec les 2 bouchons. Je peux donc penser qu'à 1500 W la mesure est valide. Je suis impressionné par le rendement ! 70 % à 1500 W.

Au-dessus de cette puissance le rendement chute. Le tube veut bien monter en puissance, la seule limite étant la dissipation d'écran (G2). Pour voir, je lui ai fait sortir 2500 W sans dépasser les 1500 W de dissipation anodique, mais 20 W de dissipation écran (c'est jouable en CW, rapport 50/50). Les dimensions de la ligne sont les mêmes, sauf l'épaisseur du cuivre qui est de 10/10e alors

### GS-23b circuit de sortie en aluminium

P in	Ua	Ia	Ug2	Ig2	Pg2	Ug1	Ig1	Pg1	Pa	Pout	Gain	R	Temp
W	V	mA	V	mA	W	W	mA	W	W	W	%	%	°C
0	3460	0	0	0	0,0	-34	0	0,00	0	0	0	0,0	25
0	3350	200	490	0	0,0	-34	0	0,00	670	0	0	0,0	42
11	3320	370	490	4	2,0	-34	0	0,00	728	500	16,6	40,7	38
22	3280	620	490	15	7,4	-34	1	-0,03	1034	1000	16,6	49,2	54
25	3250	650	490	20	9,8	-34	7	-0,24	1013	1100	16,4	52,1	56
30	3230	700	490	22	10,8	-34	18	-0,61	1061	1200	16,0	53,1	60
40	3210	750	490	24	11,8	-34	25	-0,85	1008	1400	15,4	58,2	62
50	3200	800	490	26	12,7	-34	30	-1,02	1060	1500	14,8	58,6	65
Val. Max		3500	1600	500			12,5	-100		1,5	1500		100

### GS-23b circuit de sortie en cuivre

P in	Ua	Ia	Ug2	Ig2	Pg2	Ug1	Ig1	Pg1	Pa	Pout	Gain	R	Temp
W	V	mA	V	mA	W	W	mA	W	W	W	%	%	°C
0	3460	0	0	0	0,0	-34	0	0,00	0	0	0	0,0	25
0	3370	150	490	0	0,0	-34	0	0,00	506	0	0	0,0	35
7,5	3340	310	490	2	1,0	-34	0	0,00	535	500	18,2	48,3	37
15	3330	530	490	9	4,4	-34	0	0,00	765	1000	18,2	56,7	40
17	3320	560	490	10	4,9	-34	2	-0,07	759	1100	18,1	59,2	43
19	3310	600	490	11	5,4	-34	8	-0,27	786	1200	18,0	60,4	48
23	3305	625	490	15	7,4	-34	13	-0,44	666	1400	17,8	67,8	53
26	3300	650	490	20	9,8	-34	18	-0,61	645	1500	17,6	69,9	56
Val. Max		3500	1600	500			12,5	-100		1,5	1500		100

que l'alu était de 15/10e. Je pense que ce paramètre peut être laissé de côté, l'état de surface aussi, la conductibilité thermique également ! Reste la conductibilité électrique, bien sûr le cuivre est meilleur : 1,712, l'alu : 2,709 ! Mais pas beaucoup moins bon que l'argent : 1,617 ! Je pense que, au vu des essais de la ligne en cuivre, la conductibilité ne fait pas tout ! J'explique : le rapport des capas d'accord et d'antenne a été complètement différent avec le cuivre : plus de capa d'accord, moins de capa sur l'antenne ! (donc plus de Q sur le CO). La simulation ayant donné une "super adaptation" du circuit (en cuivre dans la simulation) je me pose une question : l'inductance est-elle la même avec le cuivre et l'alu ? Il se peut qu'elle soit différente ? L'inductance aurait-elle changé ? Je ne le crois pas trop et je pense que le facteur "Q" y est pour beaucoup.

**NDLR-F6AEM : le rapport de transformation entrée/sortie est fonction du facteur Q du circuit. Si celui-ci est modifié, les points de branchement sont donc différents pour retrouver la même transformation d'impédance et/ou il faut modifier les réactances conjuguées des circuits d'adaptation.**

Que penser des réalisations en laiton non argenté avec 6,29 ?

#### Conclusion

le cuivre est bien meilleur que l'alu (pas que sur le papier), la linéarité est "super" avec moins de 1dB de compression à 1500 W (parfait pour la BLU) ! Le rendement est comme dans les "livres", le gain de 3dB en plus ! En fait, que du mieux (je n'en suis toujours pas revenu) !.

#### Conditions des mesures :

Transceiver IC-746 en CW.  
Atténuateur 30dB 2000W Bird.  
Wattmètre Bird :  
43 Bouchon 1000C.  
Coupleur directif EME.  
Atténuateur 10 dB 3 W HP.  
Analyseur de spectre Systron Donner mod 4808.  
Miliwattmètre Férisol NA300A.

#### Revenons sur les tableaux de mesures :

Suite à la remarque ( justifiée ) de F6CER du comité de lecture du REF, voici des précisions sur les puissances et les rendements ! la chaine de mesure utilisée ne comporte pas d'élément sélectif, de ce fait la mesure de la puissance fait apparaître la valeur de la fondamentale plus ses harmoniques ! d'autant que le coupleur directif employé monte haut en fréquence ( son couplage augmentant avec la fréquence la lecture est largement majorée par les harmoniques )

Je pense donc que les mesures jusqu'à 1000 W sont 10 à 15% au dessus , après je ne sais pas ! Il aurait fallu que je mette un Passe Bas entre le Wattmètre et la charge pour réduire les Harmoniques . De ce fait les tableaux sont moins beaux ! Mais quand même une chose est vraie ça marche bien ! La vraie mesure sur l'antenne avec un passe bas est : 1500 W au max avec 38 W d'excitation , 57 % de rendement , 12,5 W de dissipation d'écran et un point de compression à 1 dB vers 1200 W !!!!.....

Ceci termine les essais du PA ! Même si certains de mes copains ont parlé d'argenture ! Je leur dis non!

#### Un petit rappel :

Sachez que vous n'êtes pas seul sur la bande ! et votre liberté s'arrête où celle des autres commence !

Donc pas de PA QRO pour faire un QSO bla bla à 100 km, pas plus que pour faire un contest sur un point haut ! Pour ne citer que ces deux exemples. A bon entendre !...

**BRÈVES  
BXC**

#### filtres à ondes acoustiques de surface (SAW)

Dans ce type de dispositif, un couple d'électrodes déposé à la surface d'un substrat piézoélectrique engendre des contractions et des dilatations du matériau à une fréquence qui dépend du signal appliqué. Ces déformations se propagent ensuite dans le substrat et génèrent un signal électrique dans un deuxième couple d'électrodes. La forme des électrodes (en forme de peigne) détermine la bande de fréquences qui peuvent "passer" d'un couple à l'autre. D'où la fonction filtre.

#### fibre optique à partir d'un fil de soie

Yushan, de l'université californienne de Riverside, a fabriqué des fibres optiques à partir du fil d'une toile d'araignée. La technique consiste à l'enrober d'une pellicule vitreuse, puis le laisser sécher et enfin cuire le tout pour éliminer la soie. Résultat, une fibre de verre creuse ultrafine capable de transporter des rayons lumineux et de s'intégrer dans un nanocircuit optique. La taille, quelques nanomètres, c'est-à-dire 50000 fois plus petit qu'un cheveu, permettra d'améliorer la résolution des microscopes optiques en champ proche utilisés dans les nanotechnologies, et bien d'autres applications.

#### substrats hypers

Il faut trouver un compromis entre coût et performance. Le résultat donne que les substrats hyperfréquences en résine polybutadiène chargée de céramique sont une alternative économique aux très performants substrats PTFE. À l'inverse, les substrats à base de résine PPE sont moins performants à haute fréquence.

#### déphasier les signaux HF

La société américaine Lumera vient de construire un déphaseur destiné aux antennes à diagramme de rayonnement actif qui serait plus précis que les méthodes actuellement employées pour déphasier les signaux radiofréquences. Elle utilise un polymère aux propriétés électro-optiques qui introduit par exemple un déphasage de 45 degrés sur un signal de 16 GHz si ce polymère est soumis à une tension de 35 V. La tension nécessaire pour activer ce déphaseur serait ainsi nettement réduite par rapport aux modèles actuels tandis que la bande de fréquence utilisable pourrait être étendue jusqu'à 100 GHz.

