

Quelques techniques de conception en hyperfréquence

Matthieu CABELLIC F4BUC
f4buc@orange.fr

Voici quelques règles et techniques qui s'appliquent à la conception de circuits hyperfréquences, en particulier dans le cas de l'utilisation des lignes micro-ruban (« microstrip »).

Toutes ces règles montrent qu'il suffit en fin de compte de comprendre le cheminement des courants HF pour bien maîtriser un design. Souvent, cela n'est pas très intuitif, ce qui justifie l'importance de respecter scrupuleusement certaines règles de conception pour tous les designs. Le non respect de certaines règles risque d'entraîner de mauvaises performances mais surtout le fait de ne plus maîtriser le fonctionnement de son circuit.

Il faut reconnaître que beaucoup de circuits ne respectent pas scrupuleusement les règles et fonctionnent correctement. Cependant les ennuis qui peuvent potentiellement se manifester peuvent faire perdre beaucoup de temps au concepteur (expérience vécue). Lorsque l'on acquiert une certaine expérience en conception, on comprend vite l'importance de « sécuriser » les designs le plus possible.

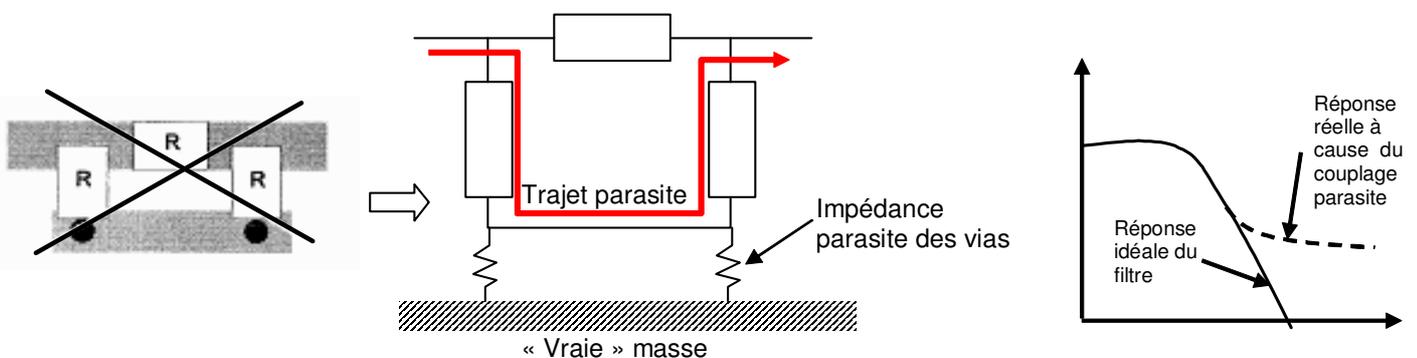
Comment réaliser correctement les mises à la masse ?

Il est important de respecter les deux règles suivantes :

- Ne pas relier les vias de masse de composants différents sur le même bandeau de masse face composants
- Ne pas utiliser un même via de masse pour deux composants différents

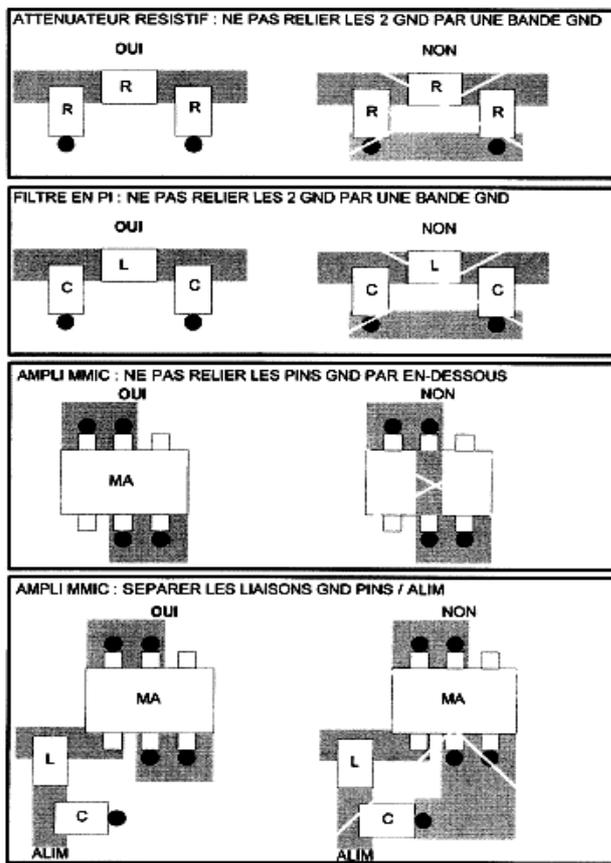
En effet un via de masse présente toujours une petite impédance parasite (selfique). Par conséquent la mise en commun de vias ou bandeaux de masse va créer des couplages parasites dits par impédance commune entre les composants.

Par exemple pour l'atténuateur en PI, un bandeau de masse commun crée un trajet parasite du signal HF entre les deux extrémités des résistances, c'est à dire un couplage parasite entre l'entrée et la sortie de l'atténuateur. Cela est plus critique encore si l'on réalise un filtre destiné à présenter une réjection importante. La réjection ultime du filtre sera limitée par ce couplage parasite. Il suffit de regarder sur la figure suivante le trajet parasite du courant HF.



Les conséquences peuvent être bien plus catastrophiques dans le cas d'amplis de types MMIC : perte de gain, désadaptation, accrochage...

Les figures suivantes montrent dans quels cas il est nécessaire d'appliquer cette règle. En guise d'exercice, essayer d'analyser les risques de couplage parasites.



NE PAS RELIER PAR UNE BANDE GND LES GND DE 2 FONCTIONS DIFFERENTES

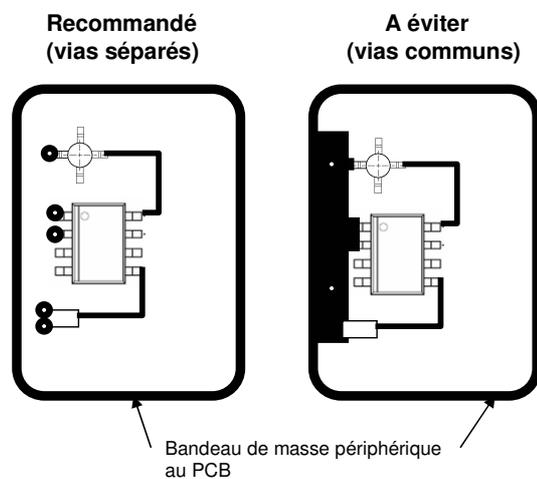
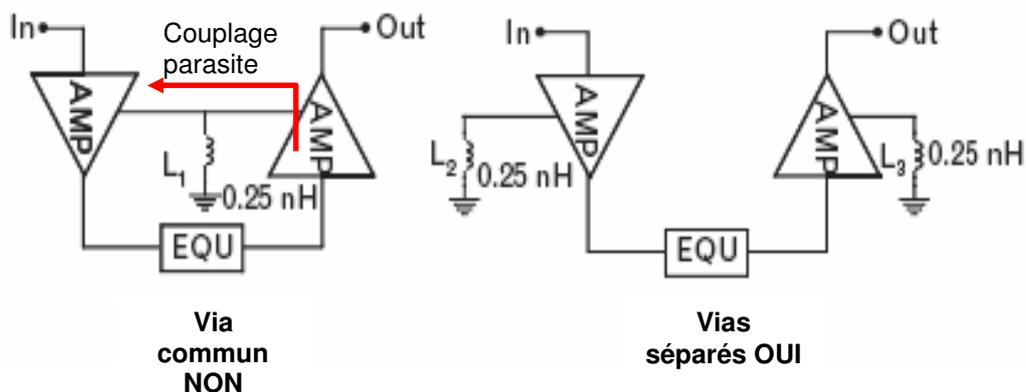
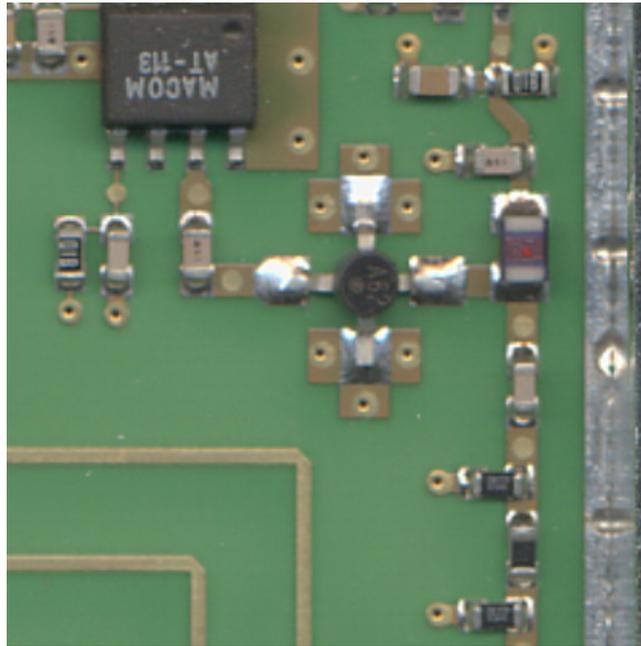


Illustration du chemin parasite dans le cas de deux étages amplificateurs :



En guise d'illustration, voici une photo d'une carte professionnelle dont le routage a respecté toutes ces règles. A vous de les repérer pour vous entraîner.

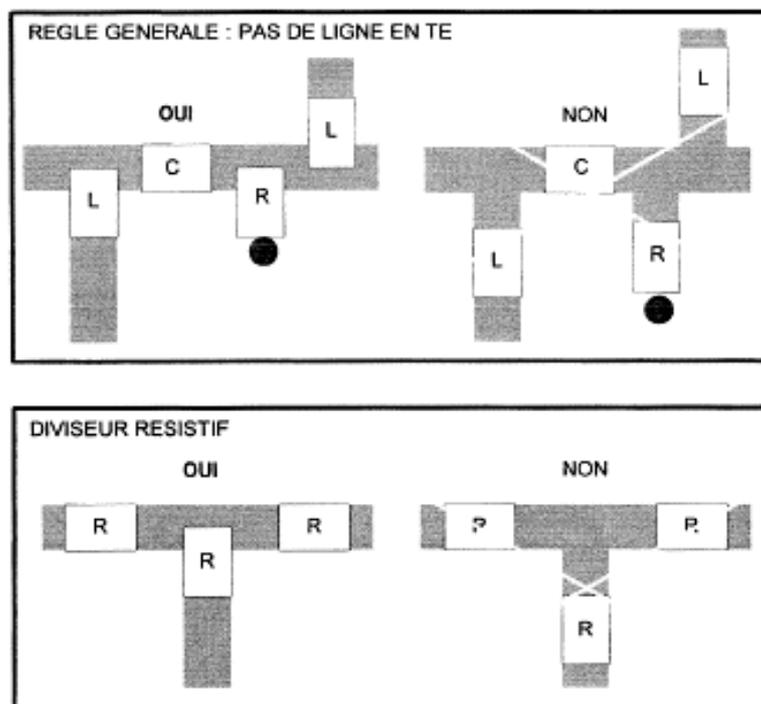


Les bandeaux de masse ne sont pas à proscrire, ils peuvent servir à souder des parois de blindage et peuvent être bien pratiques comme accès à une masse coté composants lors des mises au point. Les bandeaux de masse peuvent aussi servir d'écrans de blindages sommaires entre deux fonctions très proches.

Raccourcir la longueur des pistes au minimum

Il est recommandé de raccourcir le plus possible les pistes afin de minimiser les inductances parasites.

La figure suivante montre comment procéder. De façon générale il ne faut pas hésiter à souder l'extrémité des composants sur la ligne elle même car, comme nous allons le voir plus loin, le courant HF passe principalement sur la face de dessous de la piste.



Comment réaliser de bons découplages hyper ?

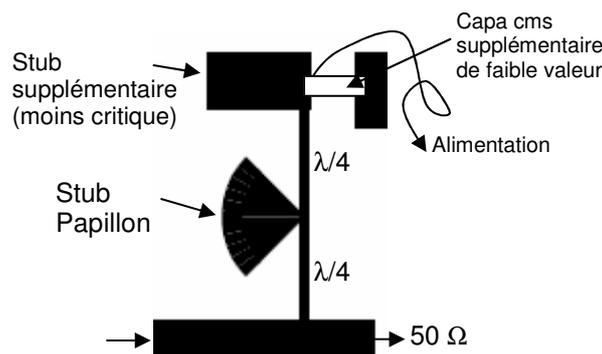
En hyper, lorsque la bande utile est petite devant la fréquence (c'est-à-dire toujours le cas dans le domaine amateur), le bon moyen d'y arriver est d'utiliser un découplage en lignes quart d'onde. Pour réaliser correctement de tels dispositifs de découplage, il faut utiliser une première ligne quart d'onde de forte impédance, c'est à dire de largeur plus fine que la piste 50 Ohms, puis une ligne quart d'onde d'impédance faible, c'est à dire plus large.

Pour cette dernière ligne le mieux est d'utiliser un stub « papillon ». L'effet capacitif lié à son évasement contribue à abaisser efficacement l'impédance à son extrémité. Cela a aussi pour effet d'élargir la bande de fréquence du dispositif.

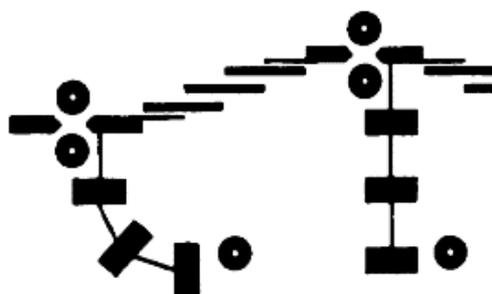
Un tel dispositif de découplage fonctionne bien sur une bande égale à environ 20% de la fréquence centrale.

L'extrémité étroite du papillon, même si elle est de faible impédance, est le point « sensible » qu'il faut considérer. Il est donc conseillé de rajouter un autre étage de découplage quart d'onde afin de perturber au minimum ce point sensible. Enfin il est d'usage de parfaire le découplage à l'aide d'un condensateur CMS de faible valeur relié à la masse (par exemple une capa de 10pF en parallèle avec autre de 10nF à 10GHz).

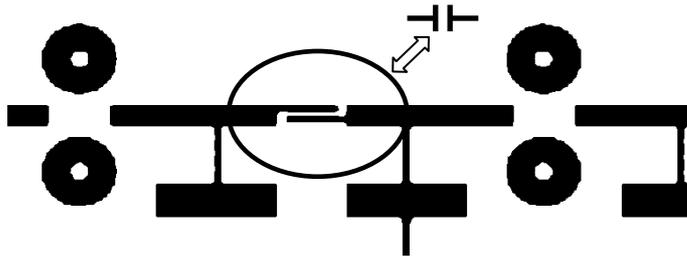
La figure suivante représente en fin de compte la topologie d'un bon découplage hyper.



Pour encore améliorer le découplage de l'ensemble, il est possible de cascader plusieurs découplages si la place le permet. La figure suivante est un exemple de réalisation de S53MV sur 24GHz.



Concernant le découplage en série sur la ligne 50 Ohms, à partir de 24GHz, il devient avantageux de réaliser les capacités de découplages série entre étages par le biais de la ligne micro-ruban elle-même en formant des capas interdigités. Cela économise un condensateur CMS et surtout ses effets parasites associés.



Dans tous les cas il est avantageux d'utiliser les filtres à lignes couplées pour réaliser le découplage série.

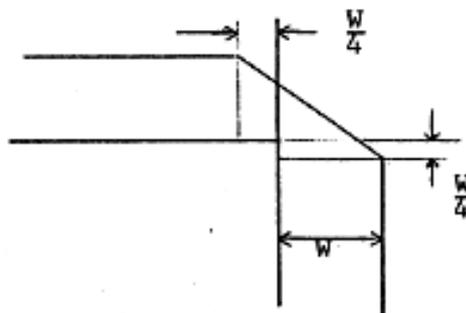
Enfin il ne faut pas oublier que dans un circuit hyper les composants utilisés ont en général un gain « correct » sur la fréquence hyper mais que sur les fréquences plus basses, en VHF et en HF, voir même encore en hyper, ils présentent un gain beaucoup plus important. Par exemple un ATF35176 va présenter un gain de 7dB à 24GHz tandis qu'à 10GHz il présentera un gain de 15dB soit 8dB de plus. Ainsi une chaîne constituée de quatre GasFet similaires va présenter un gain de 28dB à 24GHz mais 60dB à 10GHz ! Par conséquent le fait de cascader plusieurs amplificateurs hyper (MMIC, GasFet) sur le même circuit risque de créer un amplificateur présentant gain énorme sur les fréquences inférieures et donc des oscillations parasites. En guise de précaution, une bonne pratique de conception des étages cascades en hyper consiste à disposer des filtres entre les étages.

Remarque : dans le cas des capas interdigitées, on a tout intérêt à former un résonateur à la fréquence de travail.

Comment réaliser des courbures de lignes micro-ruban?

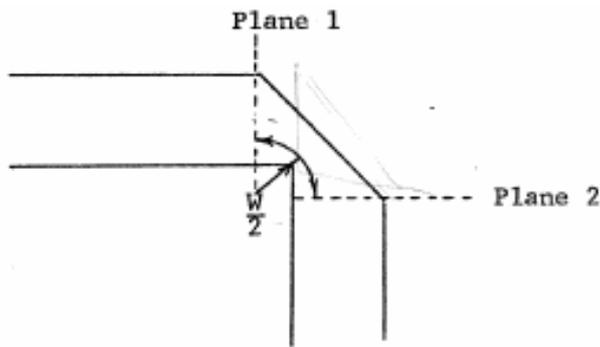
Une courbure d'une piste micro-ruban risque de provoquer des discontinuités engendrant une rupture d'impédance et donc un return loss parasite. Une rupture d'impédance peut aussi générer un rayonnement parasite de la ligne (effet antenne) et donc causer des couplages parasites.

La figure suivante donne la règle à appliquer afin de perturber le moins possible l'impédance d'une ligne micro-ruban.



Cette façon de dessiner la ligne en biseau évite d'ajouter une petite capacité parasite qui perturberait l'impédance de la ligne.

La longueur électrique équivalente l_{equ} de cette courbure est donnée sur la figure suivante :

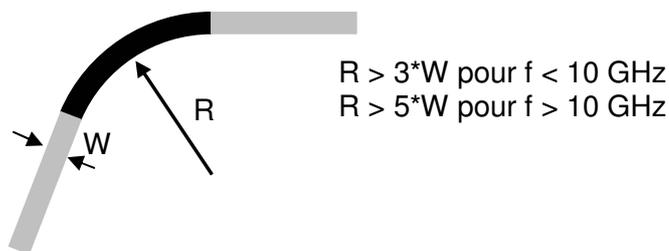


Entre Plane 1 et Plane 2 :

$$l_{equ} = \frac{\pi}{4} \cdot W$$

C'est important dans le cas où la longueur de la ligne est critique (coupleurs, déphaseurs).

Il est possible également de réaliser la courbure par un arc de cercle. Dans ce cas il faut utiliser un rayon de courbure minimum empirique de trois fois la largeur de la piste jusqu'à 10GHz et de cinq fois au dessus. De cette façon les caractéristiques de la ligne restent identiques à celles d'une ligne droite.



$R > 3 \cdot W$ pour $f < 10$ GHz
 $R > 5 \cdot W$ pour $f > 10$ GHz

La circulation du courant sur une ligne micro-ruban

Le phénomène qui apporte le plus de pertes en hyper sur les conducteurs est l'effet de peau. Quand la fréquence augmente, les courants HF sont obligés de circuler sur une épaisseur de plus en plus mince à la surface du conducteur.

La question à se poser pour les lignes micro-ruban est donc de savoir sur quelle qualité de surface doivent circuler les courants HF.

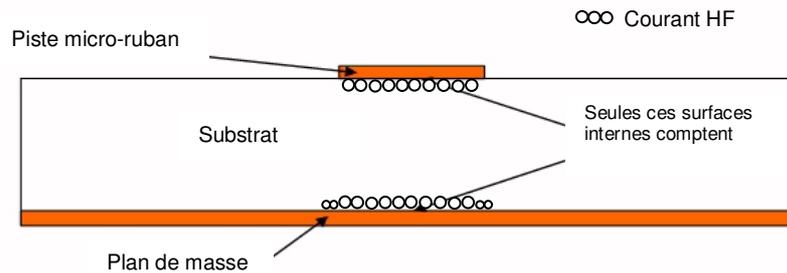
Sur une ligne micro-ruban le courant HF circule principalement en dessous de la piste, car il fait face au courant qui circule, lui, sur le plan de masse.

Ainsi la couche de métal la plus importante pour une ligne micro-ruban n'est pas la couche de finition visible du dessus mais la couche de cuivre du dessous. La « zone » sensible, là où les pertes s'accumulent, est donc la zone d'interface entre le cuivre et le substrat.

La surface de contact du cuivre au substrat est donc très critique et dépend donc directement du procédé de fabrication. Pour du substrat non dédié aux hypers comme l'époxy FR4, la surface de contact est assez rugueuse pour permettre l'adhésion facile du cuivre, méthode économique. Cela conduit en hyper à des pertes et de plus elles peuvent varier de façon importantes selon le procédé du fabricant (même si dans les deux cas le substrat reste rigoureusement le même), ce qui est néfaste à la reproductibilité du design.

Pour des substrats spéciaux dédiés aux hypers comme le téflon ou le RO4003, le dépôt de cuivre est réalisé avec beaucoup de soin et cette fois-ci la surface d'adhérence cuivre-

substrat est beaucoup plus lisse. Les pertes sont alors plus faibles. Bien sur, ces pertes doivent ensuite s'ajouter à celles du substrat lui-même.



Etant donné que les courants HF circulent « sous » la ligne microruban, la finition du cuivre des pistes (étamage, argentage, dorure, ...) ne sert finalement pas à autre chose à part éviter la corrosion du cuivre (vieillessement) mais n'améliore pas les pertes HF. Argenter les pistes micro-ruban dans l'espoir de diminuer les pertes ne sert pas à grand-chose, quelque soit la fréquence.

De la même manière, la qualité et la quantité de la soudure d'un composant sur une ligne micro-ruban n'a finalement pas autant d'incidence que l'on pourrait le croire.

Par contre il faut éviter d'épandre du vernis couvrant à la fois les pistes et le substrat car cela va perturber les lignes de champ émanant des bords de la piste et ajouter des pertes supplémentaires. Soulignons également qu'à partir de 24GHz, les résidus de flux de soudure commencent à apporter des pertes non négligeables. Il convient donc de nettoyer les résidus et laisser les bords des pistes bien propres et nettes.

A propos de la réalisation pratique des vias

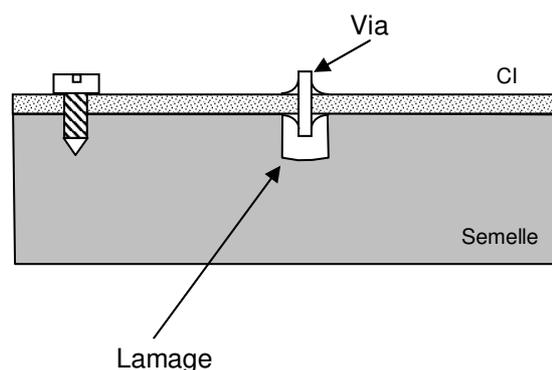
Beaucoup pensent que la réalisation correcte des vias n'est possible que par un professionnel, seul, il est vrai, à maîtriser la technologie de métallisation des trous d'un circuit imprimé.

Cependant au niveau amateur un via très performant en hyper peut être facilement réalisé par un bout de fil conducteur soudé sur les deux faces du circuit imprimé.

Cependant pour assurer une bonne qualité du via il est recommandé d'utiliser du fil argenté d'un diamètre de l'ordre de 6/10 au minimum.

Un autre problème se pose lorsque le circuit imprimé doit être plaqué sur une semelle métallique (radiateur ou blindage). Nos vias amateurs vont créer des bosses de soudure qui vont empêcher de plaquer convenablement le CI sur le plan de masse.

Pour remédier à ce problème il y a une astuce toute simple consistant à réaliser un trou borgne dans la semelle juste au niveau du via.



Voici comment procéder:

- plaquer le CI non encore percé sur la semelle et le maintenir bien plaqué
- percer le CI aux emplacements des vias et prolonger légèrement le perçage afin de marquer la semelle avec le foret
- retirer le CI, les vias étant marqués précisément sur la semelle il reste à réaliser des trous borgnes avec un foret de diamètre plus important (disons 3 mm)
- à la soudure du via coté plan de masse il faudra veiller à ne pas étaler la soudure à plus de 1,5mm du via (sinon retirer l'excès à la tresse à dessouder).

Réalisation pratique des connections hyper pour un CI monté sur un plan de masse

La question posée ici est de savoir comment réaliser correctement la connexion de la masse d'une embase ou de la masse d'un câble semi-rigide sur un CI qui est monté sur une semelle métallique.

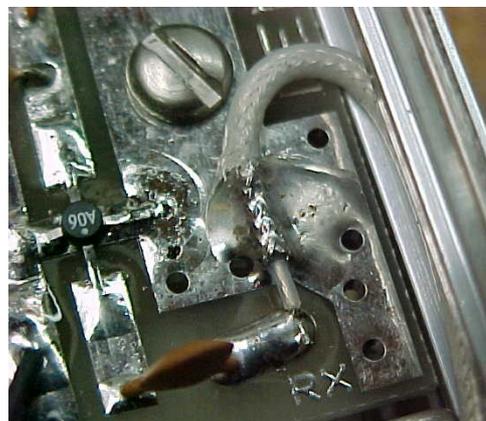
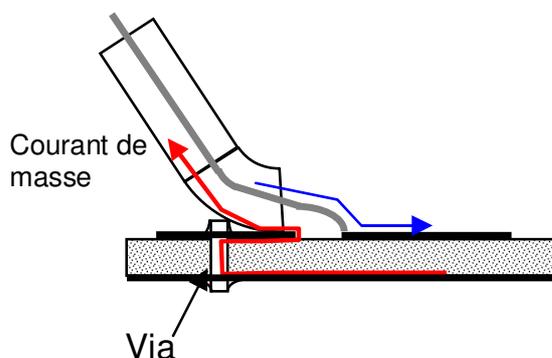
Comme vous avez dû le comprendre précédemment, il est nécessaire de maîtriser la façon dont le courant HF circule. Le courant HF de masse du CI circule sur la face interne du plan de masse du CI. Il faut donc réaliser correctement la connexion de masse afin que ce courant puisse s'écouler correctement et rejoindre le plus directement possible la masse de l'embase ou du semi-rigide.

Les méthodes suivantes sont possibles :

- Méthode 1 : Réaliser une plage d'accueil de masse sur la face supérieure du CI. Cette plage devra être relié à la face de dessous du CI par des vias. Souder la masse de l'embase ou du semi-rigide sur cette plage d'accueil.
- Méthode 2 : Visser l'embase ou braser la masse du semi-rigide sur la semelle à proximité immédiate de la piste micro-ruban ET à condition d'assurer un bon contact électrique entre la masse du CI et la semelle à proximité immédiate. Pour cela il faut soit braser la masse du CI sur la semelle (idéal) soit visser à proximité immédiate pour plaquer au mieux le bord du CI sur la semelle.
- Méthode 3 : Si cela pose un problème mécanique (vissage ou brasage), monter un carré de clinquant de cuivre soudé sous le CI et soudé à l'embase ou à l'extrémité du semi-rigide.

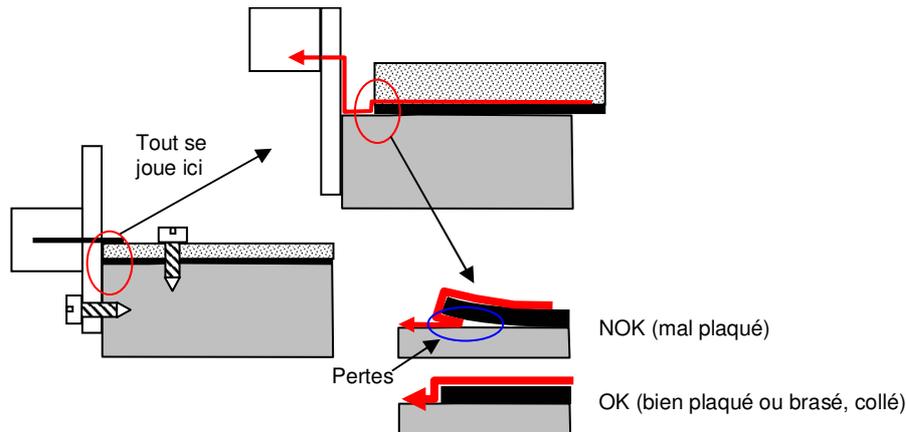
Les figures suivantes montrent ces diverses méthodes et illustrent le chemin que doit emprunter le courant HF.

Méthode 1



La masse de l'extrémité du semi-rigide est soudée sur une plage d'accueil de masse du CI relié par des vias. Sur le trajet du courant de masse c'est le via qui est critique.

Méthode 2 (pour les embases)

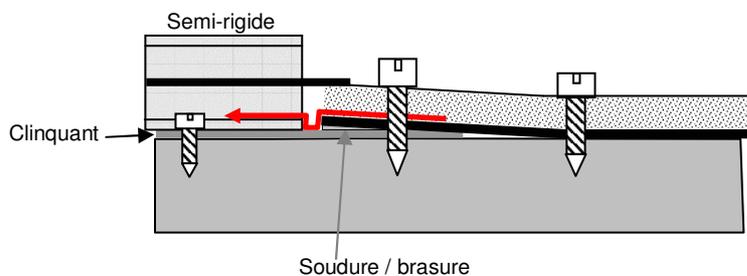


La masse de l'embase est vissée sur la semelle à proximité immédiate du plan de masse du CI. Le courant doit pouvoir passer de la surface interne du plan de masse du CI à la surface externe de la semelle et pour cela il faut que le contact électrique entre le bord du CI et la surface de la semelle soit le meilleur possible : il faut soit bien plaquer le bord sur la semelle par le biais de vis ou bien braser ou encore coller à l'argent.



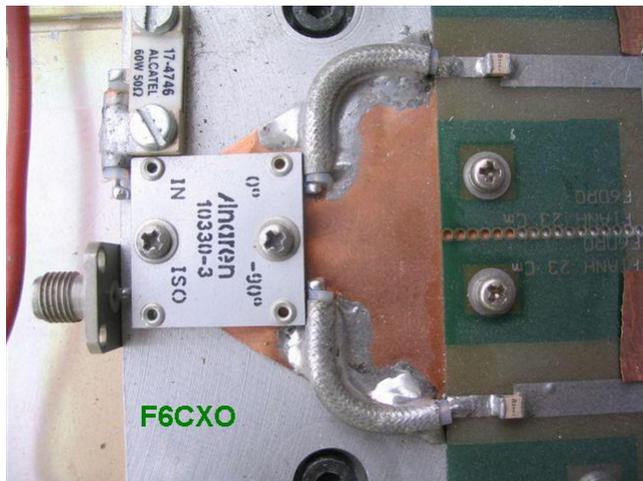
Sur la photo ci-dessus remarquer les deux vis servant à bien plaquer le CI sur la semelle métallique.

Méthode 3



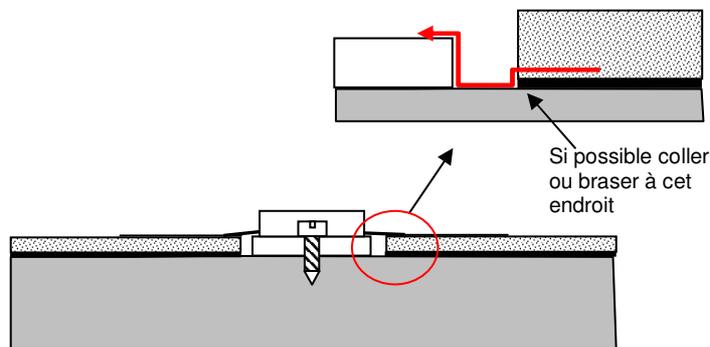
La reprise de la masse est effectuée par un clinquant de cuivre qui est disposé en sandwich entre le CI et la semelle. Le clinquant est au préalable soudé (ou brasé) sous le plan de masse du CI. La masse du semi rigide est soudée sur le clinquant. Le

cliquant est maintenu sur la semelle par des vis, tout comme le CI mais le serrage est beaucoup moins critique car la circulation du courant de masse ne se réalise plus par la semelle. Il n'est pas nécessaire de prolonger trop loin le clinquant sous le CI. En théorie c'est juste au niveau du bord du CI que c'est nécessaire. La reprise de masse est ainsi excellente.



Exemple de réalisation de F6CXO utilisant cette technique

Vous aurez compris que ces considérations s'appliquent également à d'autres cas en particulier pour la continuité électrique entre la semelle d'un transistor de puissance et le plan de masse du CI. Le courant HF en sortie circule entre la patte de drain du transistor, le stub d'adaptation sur lequel il est soudé, son plan de masse associé en regard sous le CI, la surface du radiateur et enfin la semelle du transistor.



Le courant est obligé de passer par le bord de découpe du CI juste en face de la semelle du transistor (coté drain). En général ce courant a une intensité importante car nous sommes à un point d'impédance faible. Il n'est pas évident d'assurer à cet endroit un bon contact électrique entre la masse du CI et la surface du radiateur. C'est donc

certainement sur cette zone en particulier qu'il faut insister et la colle argent ou le brasage est une bonne solution. Dans de nombreux cas une pression exercée par des vis est suffisante.

Ainsi, contrairement à ce que l'on entend souvent, il n'est pas nécessaire de vouloir absolument "plaquer" le mieux possible toute la surface du CI sur le plan de masse du radiateur. En fait il faut assurer plutôt une reprise de la masse à des zones bien précises, sur tous les bords du CI.

Lorsque l'on s'éloigne du transistor le vrai plan de masse à considérer redevient le plan de masse du CI et non plus la semelle métallique (qui est aussi le radiateur).

La règle d'or est de bien considérer toujours une seule masse à n'importe quel endroit d'un circuit et surtout au voisinage d'un composant. Il ne peut jamais y avoir simultanément deux masses à un même endroit.

Conclusions

Pour réaliser une implantation correcte d'un circuit hyper il est nécessaire de comprendre le chemin que doit emprunter le courant HF. Les règles de conceptions ont pour but de maîtriser la circulation de ces courants et donc de rendre « maîtrisable » un design RF c'est-à-dire éviter les mauvaises surprises et assurer des performances maximales.

Cet article est loin d'être exhaustif mais j'espère qu'il aura permis d'éclairer certains concepteurs ou futurs concepteurs sur quelques points importants.

Bonnes réalisations !