

Transformateur d'adaptation 1/9^e pour antenne long fil

Jean-Matthieu STRICKER F5RCT

Ce projet était le souhait des membres du radio club F5KAV à la suite du succès de l'antenne de Fred F4JQY après la réparation de son transformateur d'adaptation.

F4JQY avait acheté un transformateur commercial pour antenne long fil qui ne donnait que de médiocres résultats. Après une chute des performances, il avait constaté que le tore avait chauffé faisant fondre le bobinage dans le boîtier ! Il se trouvait que le tore, limité à 10 kHz, n'était pas du tout adapté ! F5RCT a refait ce transformateur avec un tore FT140-61 prévu pour les applications large bande. Depuis, avec un fil de 17 m, il enchaîne les QSO autour du monde du 40 m au 10 m, avec 20 W en FT8 et avec 100 W en SSB ! Les résultats étaient bien meilleurs que l'antenne HF verticale Diamond CP-6SR qu'il a revendu !

On ne dira pas que c'est un « balun » mais un « unun » ou plus précisément un autotransformateur car il ne sert pas du tout à symétriser l'antenne puisqu'elle n'est pas un dipôle mais un long fil. Ce type d'antenne, alimentée à une extrémité, nécessite un transformateur d'impédance souvent compris entre 1/9 et 1/49. Le rapport de transformation sera un compromis entre la longueur du fil, sa disposition et les bandes considérées. Il s'avère qu'une antenne rayonne correctement en fonction de sa disposition et de son dégagement par rapport au sol, mais surtout par le courant injecté et son adaptation à la ligne d'alimentation. Travailler avec un transformateur à haute impédance entre 1/25 et 1/49 a de l'intérêt pour une antenne demi-onde, mais ce fort rapport de transformation a tendance à adapter les pertes dans le tore en ferrite, finalement à réduire le courant dans le fil de l'antenne.

Le choix du matériau ferrite du tore est très important, comme F4JQY en avait fait la mauvaise expérience en achetant son transformateur en Asie ! Les tores jaune et blanc récupérés dans les alimentations d'ordinateur sont en poudre de fer, prévus pour un usage autour de quelques dizaines de kHz. Les matériaux les plus adaptés sont en ferrite à base d'oxydes ferriques (Fe_2O_3) auquel on ajoute des oxydes métalliques de nickel et de zinc pour obtenir les matériaux connus sous les références 43 et 61 du célèbre fabricant Fair-Rite Corp. Bien que ce soit très intéressant de détailler les propriétés de ces deux matériaux, retenez que le matériau 43 procure un excellent couplage en transformateur sur la plage de fréquence entre 1 et 50 MHz, tandis que le matériau 61 travaille entre 10 et 100 MHz. On peut utiliser les deux entre 3,5 et 30 MHz, à condition d'ajouter plus de spires pour le matériau 61.

Le choix dépend aussi des disponibilités dans le commerce sous différents diamètres exprimés en centièmes de pouce. La puissance admissible dépend d'un calcul entre la section du tore en fonction de la fréquence la plus basse et du nombre de spires. Il n'est pas nécessaire de prendre un tore très gros pour couvrir les bandes de 7 à 30 MHz avec 100 W. Le tore FT-140-43 est un excellent compromis entre son prix et sa taille pour 100 W à partir de 3,5 MHz.



Figure 1 : Restauration du transformateur de F4JQY.

Le bobinage d'origine était fait comme un transformateur avec 5 spires au primaire côté prise coaxiale et 15 spires au secondaire côté antenne (**figure 1 et 2**). Sur les 5 premières spires le primaire et le secondaire sont imbriqués, puis les 10 suivantes vers l'antenne sont jointives. Cette façon de bobiner rend le couplage très mauvais au-delà de 7 MHz. Le transformateur devient très inductif et on perd plus de 4 dB en transmission à 30 MHz. Par expérience il donne de bons résultats sur les bandes 80 m et 40 m avec 16,5 m de fil. Cela n'empêche pas d'avoir un bon ROS sur les bandes basses mais le couplage sera mauvais et fera baisser le rendement de l'antenne sur les bandes hautes.

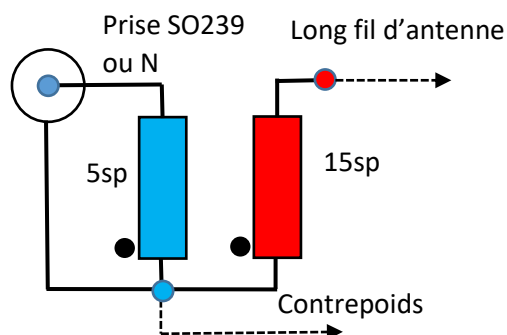


Figure 2 : Configuration en transformateur à forte inductance série

La bonne façon de bobiner un transformateur large bande sera de coupler les enroulements tout au long du bobinage comme le montre la **figure 3**. Pour y parvenir on réalise un autotransformateur avec trois enroulements identiques.



Figure 3 : Réalisation de l'autotransformateur à enroulements couplés.

Le schéma de la **figure 4** montre le principe de raccordement des enroulements. Les points noirs marquent l'entrée (ou la sortie du bobinage). Le primaire sur la prise coaxiale ne voit que l'enroulement bleu, tandis que le secondaire est formé des trois enroulements en série. On obtient un autotransformateur de rapport 1/3 en tension, donc 1/9 en impédance. La configuration de ce transformateur est la même que le « MTFT balun » de Wimo.

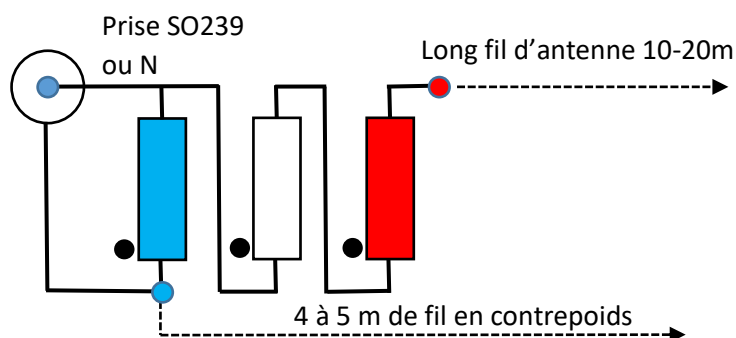


Figure 4 : Schéma en autotransformateur à enroulements couplés.

La fréquence de coupure basse sera déterminée par l'inductance de l'enroulement d'entrée face à l'impédance de 50 Ω . On prend un facteur 4 pour ne pas être dans les -3 dB de la fréquence de coupure.

Pour 6 spires sur un tore FT140-43 : $L = 27,4 \mu\text{H}$ soit : $F_c = 4 \times 50 / 2 \pi L = 1,2 \text{ MHz}$.

Pour tous les calculs d'inductance et de saturation, je me sers du petit programme « mini ring core calculator » de DL5SWB.

Estimons la puissance admissible en connaissant la tension efficace. 100 W donnent 70 Veff, on calcule l'induction magnétique pour 6 spires dans la section du tore à la fréquence donnée.

$$B_{\text{max}} (\text{Gauss}) = V_{\text{eff}} \times 10^8 / (4,44 \times f(\text{Hz}) \times N(\text{spires}) \times S(\text{cm}^2)).$$

Avec 1 Gauss = 0,0001 Tesla.

Normalement, on devrait présenter le calcul en unités Tesla, mais les Gauss sont plus parlants pour comparer les résultats avec la saturation autour de 150 Gauss.

On obtient de $B = 94 \text{ Gauss}$ à 3,5 MHz ce qui laisse un peu de marge, mais sur la bande 160 m B atteint 205 Gauss fera qui augmentera les pertes magnétiques faisant chauffer le tore ! Dans ce cas, il faudrait doubler le nombre de spires ou mieux : empiler deux tores.

Un prototype de chaque transformateur a été réalisé pour comparer les pertes et la réflexion. La mesure au VNA se fait avec 390 Ω en série avec la sortie comme le montre la **figure 5**, ainsi le transformateur est chargé par 390 + 50 Ω de l'entrée du port 2 du VNA qui font 440 Ω (proche de 450 Ω idéalement). Pour la mesure de réflexion, la sortie du port 1 du VNA voit « 50 Ω » par le transformateur chargé. Par la présence de la résistance d'essai, ce dispositif aura des pertes inévitables que l'on peut calculer et comparer à la mesure. Pour le calcul des pertes théoriques on part de la tension interne au VNA qui est au double avec 50 Ω en série (facteur 3). Au point de sortie du transformateur la tension est multipliée par trois (facteur 3) avec en série l'impédance transformée à 450 Ω . Le point rouge est équivalent à une source de 6 fois la tension interne du VNA avec 450 Ω d'impédance de sortie. Du point rouge à l'entrée du VNA, la résistance de 390 Ω forme un diviseur de tension

avec les 50 Ω de l'entrée du VNA. En négligeant la faible désadaptation, on obtient la formule en dB :

Att = 20 Log (3 x 50 / 450) = -9,35 dB ; c'est le trait en rouge sur la courbe des figures 6 et 7.

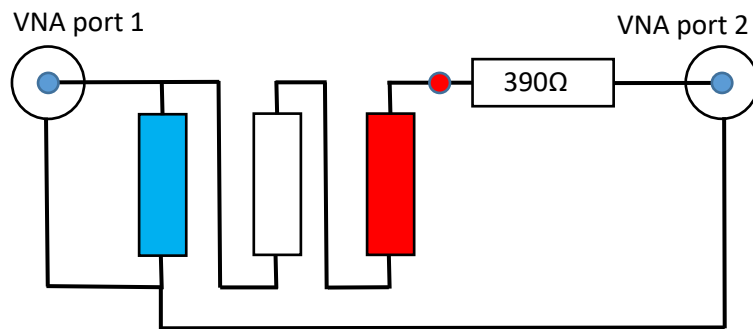


Figure 5 : Schéma pour la mesure de la perte en transmission et la réflexion.

Les relevés au VNA montrent la différence flagrante entre les deux types de bobinages.

En **figure 6**, le bobinage en 5+15 spires provoque des pertes prépondérantes au-delà du marqueur 1, la réflexion devient très médiocre au-delà de 7 MHz. Les pertes mesurées au VNA ne sont pas forcément dans le tore mais dues à l'inductance de l'enroulement qui se retrouve en série à la sortie. On peut considérer que le bobinage en 5+15 spires est un transformateur avec une forte inductance en série côté antenne. Cette inductance apporte un effet d'allongement du fil rayonnant, mais elle est défavorable au-delà de 15 MHz, ce qui fait baisser le rendement.

En **figure 7**, le bobinage à 3 fils en main apporte bien moins de pertes sur toute la bande. La réflexion reste inférieure à -20 dB de 1,6 à 30 MHz. Le couplage entre les enroulements serrés entre eux maintient une impédance plus constante et réduit l'inductance série en sortie.

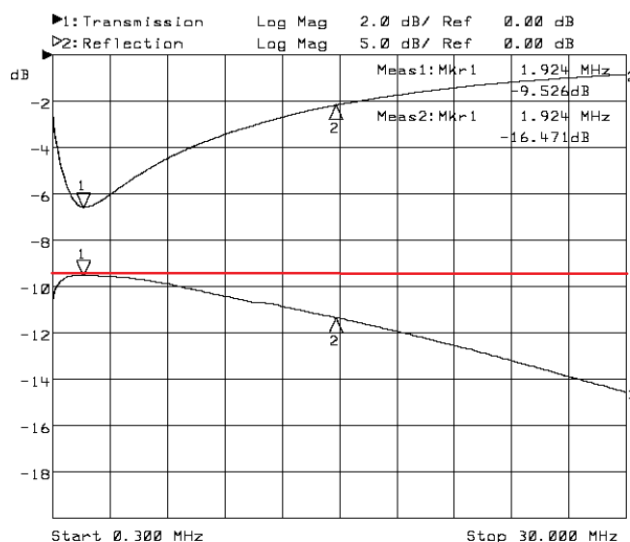


Figure 6 : Pertes en transmission et réflexion du transformateur en 5+15 spires.

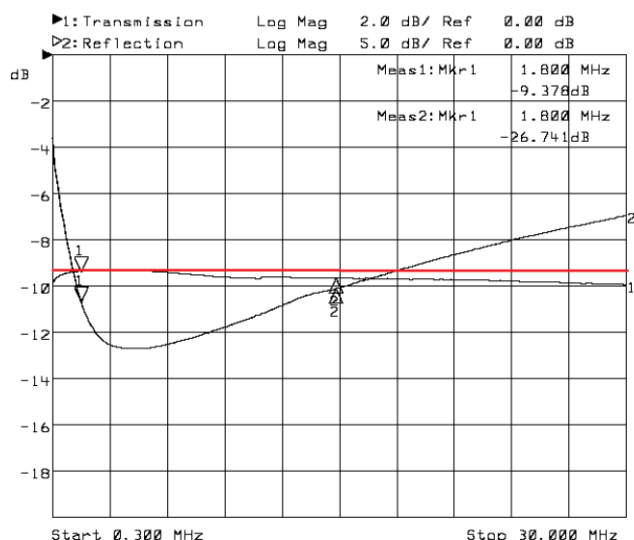


Figure 7 : Pertes en transmission et réflexion du transformateur en 3x6 spires.

Quelle longueur de fil ?

Les antennes long fil connectées à un tel transformateur sont souvent appelées « fil aléatoire » (random wire) tant par la longueur que la disposition. On souhaite couvrir le maximum de bandes, mais cela reste un compromis. Il y a des longueurs particulières en dehors d'une demi-onde et de ses multiples qui donnent un ROS acceptable sur plusieurs bandes. F4EQY a disposé 17 m de fil quasiment comme un dipôle horizontal à 4 m du sol, le contrepoids est horizontal sur quelques mètres puis descend verticalement. Dans son tableau F5NPV recommande 16 à 16,60 m par exemple [1]. Le calculateur en ligne de K7MEM montre les longueurs interdites [2]. Plus court c'est 11 m ou 37,50 m plus long.

Quel type de fil ?

On peut utiliser tout type de fil mais le rendement peut en dépendre. J'ai fait l'expérience entre un fil étamé multibrin de 0.5 mm² et un fil argenté multibrin de 1 mm² avec une différence d'un point S chez mes correspondants habituels. Rappelons que seule la résistance de rayonnement d'une antenne compte. En haute fréquence le courant circule en surface. Le fil rigide d'électricien n'est pas approprié. La conductivité du métal peut avoir une influence prépondérante sur des mètres de fil si on choisit de la corde à linge en fil d'acier. DX-Wire [3] propose le fil HDS qui comprend une âme d'acier recouverte d'une tresse en cuivre argentée.

Faut-il un fil en contrepoids d'antenne ?

Une antenne à fil long nécessite **obligatoirement** un fil de contrepoids ou dit contre-capacité. Cela peut être résolu de plusieurs façons :

- Par le câble coaxial qui va au poste, mais il peut y avoir un fort risque de retours HF dans la poste ou d'interférences. Il est recommandé de mettre des ferrites à 3-4 m du transformateur de l'antenne.
- Par un piquet de terre ou filet de terre comme contre-capacité. C'est l'idéal pour une antenne qui part du sol.

- Par un ou plusieurs morceaux de fil de 3-4 m de longueur que l'on raccordera à la borne de contreponds du transformateur.
- Par une gouttière, une clôture en acier ou tout autre élément métallique.

Par expérience, avec une antenne de 16,50 m tendue à 8 m au-dessus du sol, le câble coaxial ne suffit pas à apporter un contreponds suffisant pour faire baisser le SWR en dessous de 5 à 7 ! Rien que de raccorder 4 à 5 m de fil tendu au-dessus du câble coaxial fait baisser le SWR entre 1 et 5. Avant de toucher à la longueur du brin rayonnant, il est conseillé d'essayer différentes longueurs de fil et différentes dispositions pour le fil de contreponds. Avec le fil rayonnant et le contreponds, on n'est finalement pas loin d'un dipôle asymétrique comme c'est le cas de l'antenne Windom « FD4 ». Dans cette configuration l'impédance présentée au transformateur est moyenne et proche de $450\ \Omega$. Les **figures 8 et 9** montrent des exemples d'antenne où L est la longueur du fil.

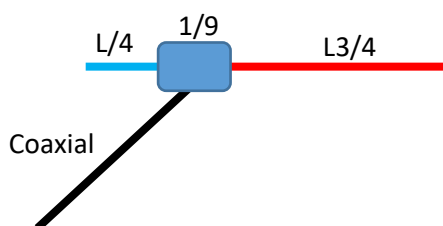


Figure 8 : Exemple d'antenne en dipôle asymétrique.

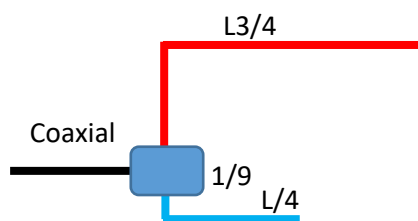


Figure 9 : Exemple d'antenne en L inversé.

Self en mode commun ou ferrite sur le câble coaxial ?

Avec ce type d'antenne long fil, il est fortement recommandé d'utiliser une bobine d'arrêt sur le câble coaxial si le contreponds n'est pas suffisant. La principale raison d'utiliser un filtre de courant en mode commun est de s'assurer que le câble coaxial ne fasse pas partie du système d'antenne comme cité précédemment. Cela se manifeste par toutes sortes d'effets néfastes tant en émission qu'en réception : retour de HF dans le microphone, alimentation qui s'affole, accrochages dans la modulation, niveau de bruit instable. Ce dernier point s'explique par le fait que non seulement le blindage du câble coaxial rayonne lorsque vous émettez, mais qu'il fonctionne également comme une antenne de réception. On peut clipper des ferrites sur le câble coaxial ou insérer une bobine d'arrêt en mode commun directement derrière le transformateur de l'antenne ou 3-4 mètres après le transformateur. Ce morceau de câble coaxial entre le transformateur et le filtre en mode commun sert alors de contre-capacité. On peut facilement faire une telle bobine d'arrêt en enroulant du câble coaxial sur un tore comme le montre F5NPV [1].

La réalisation pratique est détaillée dans un article à part que vous pourrez télécharger sur le site du radio club F5KAV dans la rubrique « articles de F5RCT > Réalisations > Antennes » [4]. La plupart des composants et le boîtier se trouvent sur un site asiatique bien connu, le tore en France chez Zenith Antennes (méfiez-vous des autres sources !). Le radio club dispose encore que quelques kits accessibles dans la rubrique « Kits F5KAV ».

- [1] <https://f5npv.wordpress.com/endfed-random-wire-efrw-antenna/>
- [2] https://k7mem.com/Ant_End_Fed.html
- [3] <https://www.dx-wire.de/dx-wire-antennendraehete-litzen/>
- [4] <https://www.f5kav.fr/articles/2021/07/articles-f5rct>