

Antenne verticale 40 m "Slinky"

Cette antenne idéale pour le trafic en portable allie performance, parfaite adaptation et rapidité d'installation, quel que soit l'environnement.

Le nom déposé à ce ressort jouet est Slinky. Celui-ci est issu du bruit métallique quand il dévale les marches d'un escalier : *slink, slink, slink...* Il a été inventé en 1943 par un ingénieur naval Américain de Philadelphie [1]. Un jour, il montra à sa femme ce ressort rebondir sur le sol en disant qu'il peut en faire un jouet. Ce produit est devenu populaire en 1945, et 60 ans plus tard, il s'en est vendu plus de 300 millions dans le monde pour le bonheur des enfants et aussi celui des radioamateurs ! Ce ressort d'environ 97 spires et d'un diamètre externe de 7 cm (2 pouces $\frac{3}{4}$) contient environ 20 m de fil d'acier plat. Il peut être étiré sur plus de 5 mètres sans déformation permanente. Ses caractéristiques en font aussi une antenne idéale en espace restreint qui a été principalement décrite en dipôle horizontal [3].

Lors d'une sortie d'activation du radio club F5KAV à la tour du télégraphe Chappe de Saverne en 2015, Marc F4HAL rencontrait de nombreuses difficultés à tendre un dipôle G5RV entre deux arbres alors qu'il m'était plus facile d'ériger une antenne Yagi à 9 éléments ! L'idée du harpon pour envoyer une fine ficelle était bonne, mais à plus de 10 m de hauteur la flèche était rapidement limitée par le poids croissant de la ficelle ! Ce n'est qu'en automne dernier que je vis F4EGX envoyer, avec aisance, une masselotte dans la canopée avec une catapulte professionnelle prévue pour l'escalade dans les arbres. Suite à ces expériences, j'ai aussi pensé aux militaires en opération qui emploient des structures d'antennes et de supports faisant abstraction de l'environnement : mât autoportants, structures complètes, antennes embarquée sur véhicules. Fort de ces constatations, il est préférable de réaliser une structure légère et indépendante du terrain sans compter sur l'environnement pour ériger son antenne. Mon idée de départ était de réaliser une antenne qui se déploie comme un parapluie pour trafiquer en campagne ! C'est-à-dire une antenne qui se monte rapidement, sans contrainte et qui prend peu de place pour le transport.

Les études théoriques dans la littérature montrent clairement les avantages pour le DX de l'antenne verticale par rapport à un dipôle demi-onde parallèle au sol. Un élément vertical rayonnant compris entre $0,125 \lambda$ et $0,67 \lambda$ envoie la majeure partie de son énergie dans le plan horizontal, favorisant ainsi les réflexions sur l'ionosphère. Ceci est valable si le plan de sol est parfait et si l'antenne est dégagée du relief et des arbres.

La théorie des antennes hélicoïdales est complexe quand il s'agit de déterminer le diagramme de rayonnement en fonction des paramètres géométriques de l'hélice. De nos jours, pour obtenir le diagramme de rayonnement et connaître le gain d'une antenne, la simulation par éléments



finis est indispensable. Il y a 20 ans et plus, on faisait appel à du calcul d'intégrales en identifiant les grandeurs qui pouvaient être négligées afin de simplifier le calcul. Cette méthode, que j'appliquais au cours de mes études, demande une réflexion souvent profitable à l'optimisation de l'antenne, alors qu'avec la simulation on procède plus facilement par itérations en changeant les paramètres.

Le champ rayonné des antennes hélicoïdales dans une direction est la résultante de deux champs orthogonaux : l'un est issu de la boucle de chaque spire (antenne boucle), et l'autre est issu d'un dipôle conventionnel (antenne filaire) [3]. Suivant la géométrie de la spirale, l'une ou l'autre composante sera prépondérante, voir les deux. Dans notre cas, retenons que pour une hélice ayant un périmètre de spire très inférieur à la longueur d'onde et un pas élevé, la composante dominante est celle d'un dipôle. Ainsi la distribution du courant le long du fil reste sinusoïdale comme dans le cas d'une antenne filaire. Mais la répartition courant / distance est modifiée ce qui peut avoir une répercussion sur la directivité. Curieusement, pour les 20 m de fil du ressort, on ne constate pas d'anti-résonance en demi-onde à 7 MHz, mais la première résonance est juste en dessous vers 6,3 MHz. La distribution du courant et le diagramme de rayonnement seraient à confirmer par simulation (je serai très reconnaissant si un OM pourrait partager ce résultat !). Pour notre antenne de 5 m comprimée le gain ne dépassera pas celui d'une antenne quart d'onde faisant 10 m sur 7 MHz.

On trouve dans la littérature des descriptions de telles antennes par des radioamateurs Russes. Souvent logés dans de grands immeubles depuis la période Soviétique, ils sont contraints de construire des antennes en espace restreint avec peu de moyens [4]. UA0RW en expose la théorie et montre bien que la directivité du champ est comme une antenne verticale courte.

Pour accorder cette antenne, on supposerait qu'il suffirait de jouer sur la longueur du ressort pour la faire résonner sur une fréquence donnée voir couvrir plusieurs bandes, mais cela ne se passe pas ainsi étant donné que la longueur du fil du ressort est toujours la même ! Il est possible de faire varier la fréquence de résonance uniquement sur une plage de 10% pour une élévation de 4 à 5 m. Utilisé en antenne monopôle verticale, le ressort résonne vers 6,3 MHz pour 5 m d'élévation avec un ROS de 2 et trois radians à ras du sol. La canne en fibre de verre apporte un léger effet diélectrique et le ressort tel quel est trop long pour résonner au centre de la bande amateur 40 m. Le couper serait dommage, et difficile en raison de la dureté de son acier. Pour le raccourcir, il est plus simple de rassembler un paquet de spires en haut ou en bas de l'antenne, mais cette solution ne permettra pas d'obtenir un ROS meilleur que 2 vu la structure de l'antenne verticale avec un plan de sol.

La bonne approche consiste à mettre un réseau d'adaptation à la base qui transformera l'impédance à 50 Ohms en intégrant l'environnement : la qualité du plan de sol, les haubans, la structure et les matériaux. Le schéma de la figure 1 illustre le concept de cette antenne très simple.

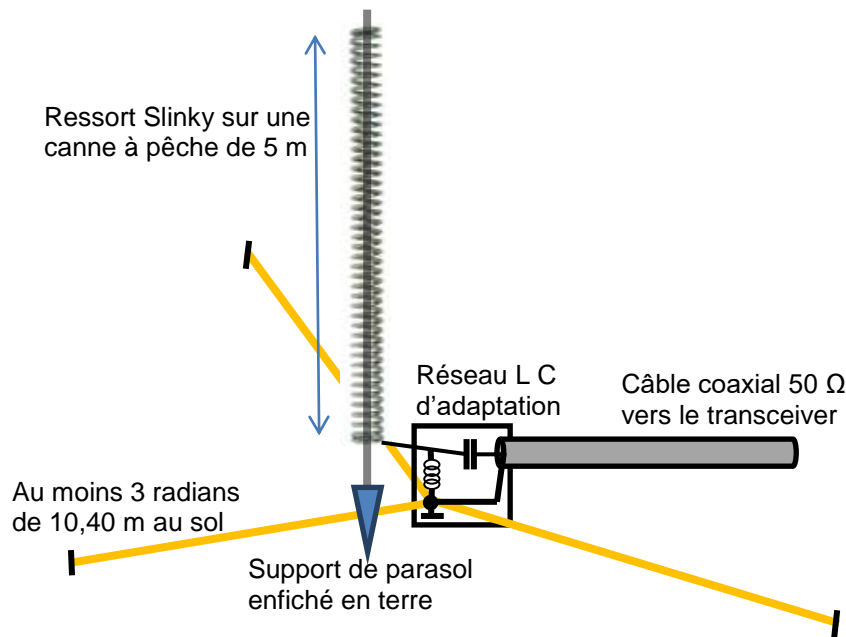


Figure 1 : Schéma de la structure de l'antenne verticale 40 m Slinky.

En partant de l'impédance de l'antenne en milieu de bande on peut déterminer les valeurs d'un réseau d'adaptation avec deux éléments L et C. Pour cela, on peut voir le cheminement des impédances dans l'abaque de Smith à chaque étape de l'adaptation.

Dispenser un cours sur l'abaque de Smith serait trop long (consultez le site de F5ZV [5] qui est très didactique ; ou les "Comment ça marche" sur les circuits réactifs des numéros précédents de Radio REF.

Rappelons quelques bases de l'abaque de Smith :

- Cet abaque représente des impédances complexes réduites $z = r + jx$. On divise chaque partie des impédances complexes $Z = R + jX$ par 50Ω avant de placer un point sur l'abaque.
- L'axe des impédances réelles ou résistives pure est sur la ligne horizontale graduée de 0 à l'infini. Le centre vaut 1, c'est-à-dire 50Ω résistif. Ce point est l'adaptation parfaite !
- Pour l'abaque d'impédance Z_0 , un point d'impédance complexe est l'intersection entre le cercle de résistance constante qui coupe l'axe horizontal des réels et la portion de cercle de réactance constante qui coupe le cercle extérieur. La moitié supérieure représente des valeurs inductives ($+jX$), tandis que la moitié inférieure représente des valeurs capacitive ($-jX$).
- Si on utilise des admittances Y_0 (inverse d'une impédance), c'est la rotation de 180° de l'abaque des impédances. Les ($-jb$) des inductances parallèle sont dans la moitié supérieure, et les ($+jb$) des capacités dans l'autre moitié inférieure.
- L'adaptation par éléments localisés L et C requiert un abaque double avec les plans Y et Z superposés. On passe ainsi de l'un à l'autre selon qu'un élément est ajouté en parallèle ou en série.

Passons à la pratique pour notre antenne à l'aide d'une application en ligne [6] et la mesure d'impédance avec le *MiniVNA-pro*.

- Le *MiniVNA-pro* ou tout autre analyseur de réseau mesure l'impédance en pied d'antenne. L'affichage en mode « Smith chart » permet de faire une vérification directe sur l'antenne.
- Avec l'application en ligne « Interactive Smith Chart » [6] aidera à déterminer les éléments L et C. Puis on les monte sur l'antenne pour vérifier et optimiser l'adaptation.

Tout cela a été traité dans des rubriques "Comment ça marche" sur les circuits réactifs et les lignes. Cela peut paraître un peu lourd mais le fait de matérialiser l'adaptation aide à trouver les bonnes valeurs de L et C.

Les expérimentations ainsi que l'antenne finale se font en présence d'un plan de sol constitué de trois radars de 10,40 m de fil de 2,5 mm². Les fils sont tendus à ras du sol par des sardines de camping. On peut aussi partir de d'autres configurations évoquée à la fin de cet article.

On commence par mesurer l'impédance de l'antenne directement à la base avec le *MiniVNA-pro*. Appelons cette impédance Z_L (Z load). Penser à effectuer préalablement une calibration au pied d'antenne avec une charge ($2 \times 100 \Omega$ en parallèle), un court-circuit et un circuit ouvert. Ceci compensera les quelques mètres de câble coaxial entre l'antenne et le VNA.

En bas de bande à 7000 kHz : $Z_L = 110 + j 64,4$ (point vert sur **la figure 2**)

Au milieu de bande à 7100 kHz : $Z_L = 111 + j 84$

En haut de bande à 7200 kHz : $Z_L = 119 + j 89,5$

Sur l'abaque de la figure 2, on peut constater que cette impédance représentée par le segment vert varie peu sur toute la bande 40 m.

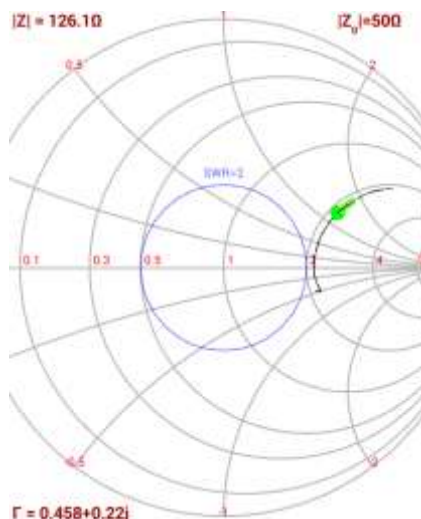


Figure 2 : Impédance de l'antenne à sa base sans réseau d'adaptation (trace en noir et point vert au début de la bande 40 m).

Par la mesure de l'impédance à l'aide *MiniVNA-pro* avec l'affichage en mode Smith ou en matérialisant l'impédance mesurée dans le cadre rouge de l'application en ligne en **figure 4**, on a un point de départ Z_L pour l'adaptation d'impédance. Puis on détermine

dans quelle configuration se trouve ce point Z_L en relation avec une des figures de Smith du tableau de la **figure 3**. Ces figures sont une aide précieuse pour le choix du réseau d'adaptions suivant les lieux d'impédance. Les zones interdites des diagrammes sont en fait impossible à adapter avec la configuration en question. Sur les huit figures, il y a au moins deux figures pour couvrir un même point d'adaptation. Les figures A et C, ou B et D, couvrent tous les cas d'adaptation. Elles illustrent le principe des boites d'accord en L. Précisons au passage que les circuits d'accord à trois éléments en Pi ou en T forment ainsi les couples d'abaques AC et BD pour couvrir la totalité des impédances avec la self comme élément en commun.

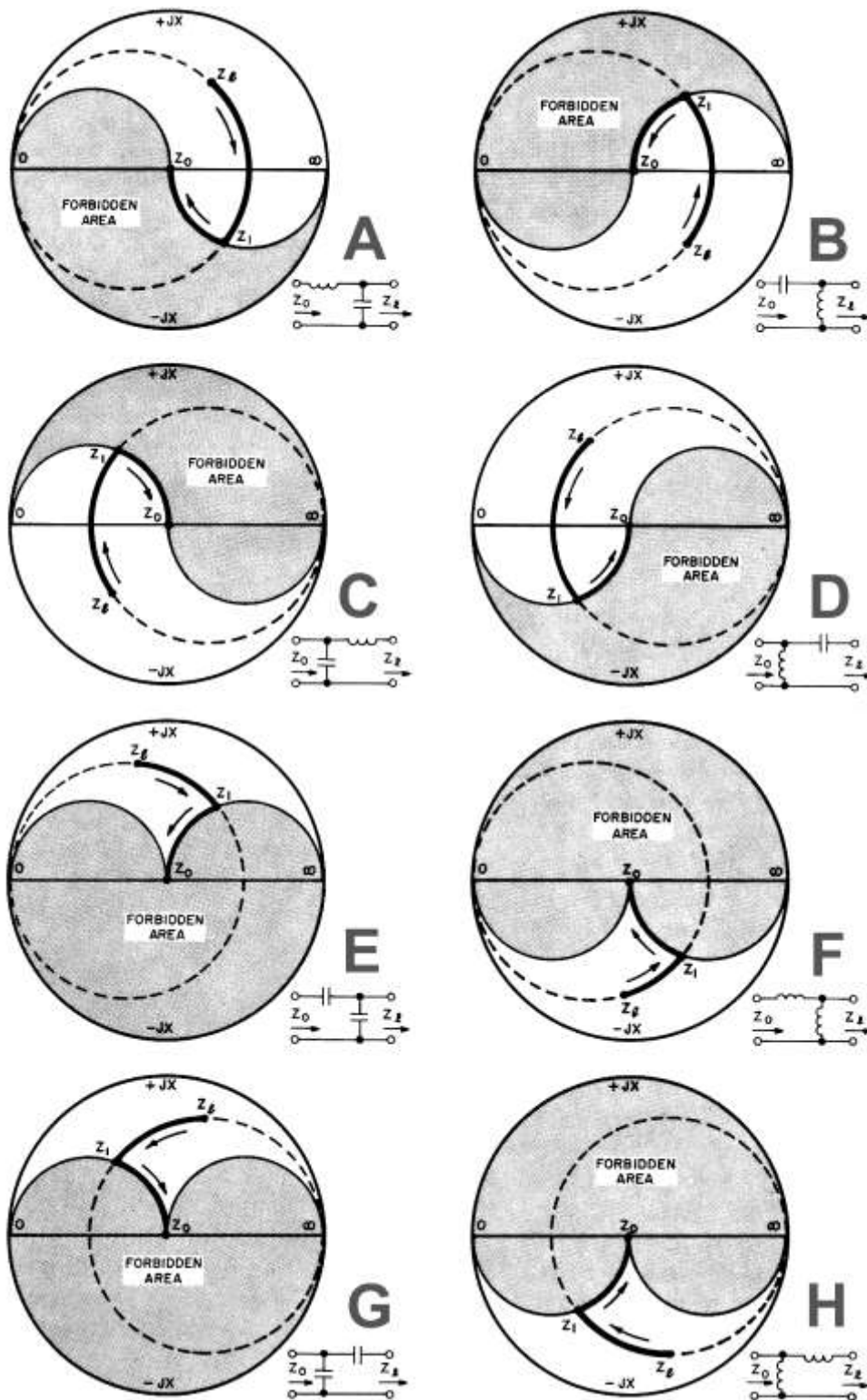


Figure 3 : Figures de Smith pour les réseaux s'adaptation en L.

En pratique, on évitera que les points Z_1 ou Z_L se trouvent trop près du bord ; ceci rendrait l'adaptation trop pointue et réduirait la bande passante finale de l'antenne.

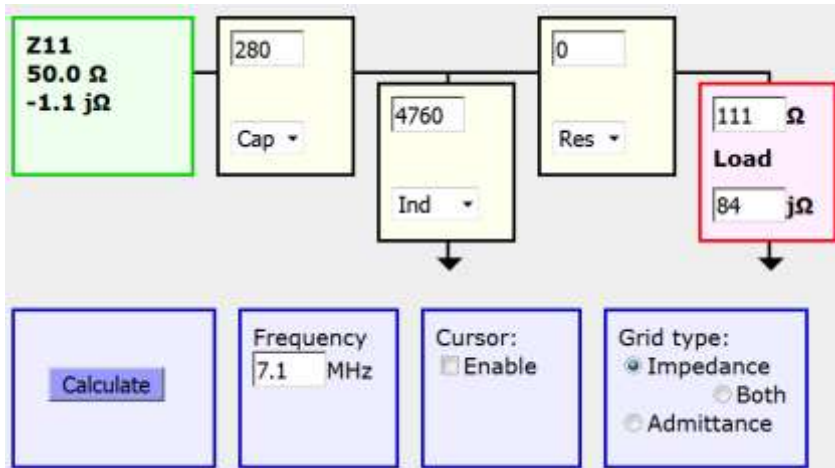


Figure 4 : Détermination théorique de l'adaptation avec une application en ligne.

D'après les diagrammes **en figure 3**, on utilisera les configurations A ou B pour adapter l'antenne avec un circuit LC. Le circuit B est préférable au A car l'inductance met l'antenne à la masse (côté Z_L). Le circuit B apporte aussi moins de pertes puisque la self ne se trouve pas en série avec la basse impédance de 50 Ohms.

Pour le circuit B retenu, avec l'inductance, le point Z_L va se déplacer vers le haut si l'inductance diminue (effet inverse par l'admittance parallèle). Par itérations successives, on recherchera la bonne valeur pour atteindre le point Z_1 qui se trouve sur le contour unité d'impédance réelle constante.

Nous obtenons par l'application en ligne une valeur de 4,8 μH . **Cette inductance est constituée de 20 spires jointives de fil de 1,5 mm sur un tube de gaine électrique de 20 mm de diamètre.** Avec cette inductance en place, la mesure au VNA montre bien que nous sommes proche de $R_s = 50 \Omega$ avec une composante inductive en série $X_s = 64,5 \Omega$ (marqueur point vert en **figure 5**).

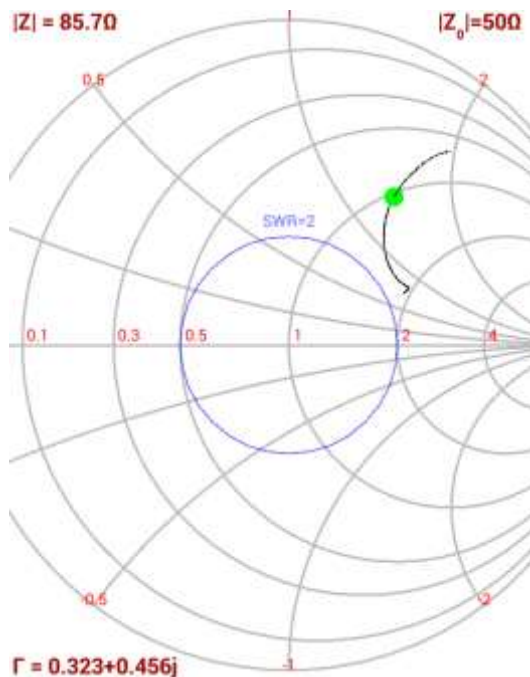


Figure 5 : Impédance de l'antenne avec uniquement 4,8 μH à la masse pour atteindre le cercle d'impédance réelle 50 Ω .

La dernière étape consiste à compenser la partie inductive ($X_s = 64,5 \Omega$) par une capacité en série de même impédance à 7,1 MHz. Le point va se déplacer le cercle de résistance constante unité réduite (**figure 6**) pour atteindre le centre. Il est possible de calculer la capacité à partir de la formule $Z_c = 1 / (C 2 \pi f)$. On peut trouver la valeur par des essais successifs directement sur l'antenne ou à l'aide de l'application en ligne (figure 5). Le résultat théorique est 280 pF ; entre 270 et 330 pF les valeurs sont assez tolérantes pour une légère augmentation du ROS. Pour ma part, j'ai placé une capacité au mica de 300 pF 5%. Le matériau du condensateur est important face aux pertes HF, la céramique ou le mica sont préférables (éviter le polystyrène MKT ou le polypropylène MKP destinés aux fréquences inférieures au MHz).

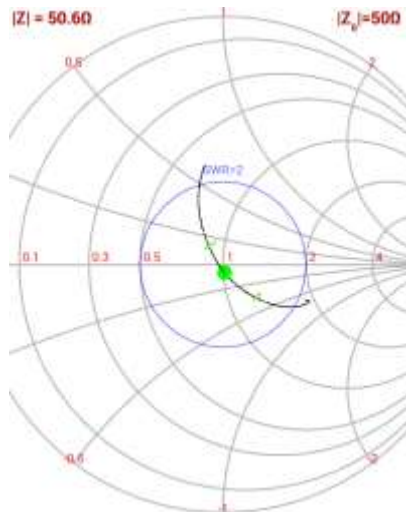


Figure 6 : Mesure de l'adaptation finale de l'antenne avec 300 pF en série après l'inductance parallèle. La bande passante de l'antenne entre les traits verts se trouve largement centrée dans le cercle à ROS = 2.

Sur la **figure 7** le boîtier d'adaptation est montré dans sa version expérimentale. La capacité de 300 pF se voit à peine entre l'âme du câble coaxial et la cosse de la vis. Près de cette vis de traversée qui va au ressort se trouve un petit fil bleu et un jeu de résistances servant à calibrer le VNA au pied de l'antenne. Dans la version finale ces deux éléments ont été supprimés. Puis le tout a été verni pour limiter la corrosion et les effets de l'humidité.

Le plan cuivré sous la self est une chute de circuit imprimé sur laquelle ont été soudés les fils des radians et la tresse du câble coaxial.

Si vous ne possédez pas de VNA mais un simple ROS-mètre voici comment faire :

- Réalisez l'antenne en respectant les dimensions de cet article
- Préparez une self d'adaptation avec 24 spires jointives de fil de cuivre émaillé 1,5 mm (1 mm convient aussi)
- Procurez-vous un condensateur variable de 400 à 500 pF ou un jeu de capacité fixe de 220, 270, 330 et 390 pF.
- Recherchez le ROS minimum à 7,1 MHz pour chaque valeur de capacité fixe ou agissez sur le condensateur variable.
- Recommencez en réduisant la self spire par spire.
- En dessous d'un ROS de 1,2 optimisez le réglage en jouant sur l'écartement des spires pour diminuer l'inductance.
- Terminez par la bonne valeur de la capacité et optimisez le ROS toujours par écartement des spires.

Le support de l'antenne est une canne à pêche en fibre de verre de 6 mètres. Les cannes en fibre de carbone ne conviennent pas ; elles conduisent la HF comme du métal ! Le dernier élément au sommet a été enlevé car il est trop souple.

La canne est bloquée dans un support de parasol en acier galvanisé. Ce support se trouve en jardinerie, ou lors d'arrivages dans certains supermarchés. Il n'y a pas de liaison électrique entre ce support et la masse de l'antenne.



Figure 7 : Vue interne du boîtier d'adaptation.

Le ressort Slinky se commande sur des boutiques en ligne. L'original vient des Etats-Unis, mais les frais de port sont élevés. Il est possible d'en commander en Chine en prenant la précaution de ne pas prendre une version miniature (mini) à prix très réduit ! Connectez-vous à *Ebay.com* et recherchez en Anglais « Beautiful Silver Metal Coil Bouncing Spring ». Prenez la précaution de vérifier les dimensions (6,5 x 7 cm) pour un prix moyen de 7,50 €. Rappelons que le diamètre est de $2\frac{3}{4}$ soit 7 cm.

Ce ressort se soude très bien à l'étain avec un fer à souder puissant. Au sommet, j'ai aménagé une demi boucle avec du fil électrique de cuivre (**figure 8**). Puis j'ai soudé une tige de 15 cm vers le bas celle-ci se glisse dans la canne. Au pied du ressort, j'ai confectionné une bretelle en Y avec du fil souple de 2,5 mm². Soudée en travers du diamètre elle répartit l'effort de traction. La bretelle fait 2 x 10 cm + 20 cm. Au bout se trouve une cosse à œillet vissée avec un paillon M5 sur la boîte d'adaptation.

La longueur de câble coaxial partant du boîtier est à votre convenance. Sur cette antenne j'ai directement soudé 10 m de câble genre RG58 de récupération d'un ancien réseau Ethernet. Le RG58 convient très bien pour le trafic en portable pour sa légèreté face à de faibles pertes : 3,6 dB / 100 m à 10 MHz, soit moins de 0,3 dB pour 10 m à 7 MHz.

Ce n'est pas le cas sur les photos mais le ressort complet a été peint à la bombe de peinture acrylique pour le protéger de la corrosion. Cette précaution est indispensable si l'on veut garantir un bon fonctionnement de l'antenne sinon l'acier rouillera rapidement et fera opposition à la circulation du courant HF en surface.



Figure 8 : Détails de l'antenne du sommet à la base.

Les radians posés à ras du sol sont au moins au nombre de trois ; chacun fait 10,40 m de fil souple de 2,5 mm². **Il est conseillé de mettre d'avantage de radians pour augmenter l'efficacité de l'antenne.** Passer de 3 à 16 radians augmentera l'efficacité de 2 dB. Autant prévoir un nombre suffisants de radians au départ du projet car le nombre de radian peut changer l'impédance de l'antenne.

Une variante donnant un bon compromis est 2 à 6 radians avec la base de l'antenne et les radians tendus horizontalement à 1,50 m du sol ; les extrémités des radians étant isolées. Cette configuration a été testée avec une antenne « Cibi » convertie en un fouet quart d'onde de 5,3 m résonnant sur 14 MHz.

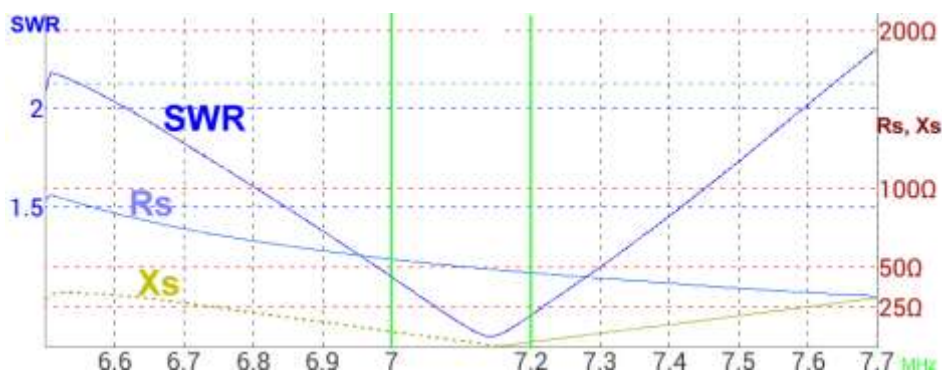


Figure 10 : Courbe de ROS (SWR) inférieur à 1,5 sur la bande 40m et d'impédance de l'antenne adaptée.

En portable, cette antenne me donne entière satisfaction avec des signaux comparables à mon dipôle Lévy de 2 x 11 m à 6 m du sol. Avec peu de puissance, entre 10 et 50 W sur un IC-706, je contacte aisément toute l'Europe en BLU et mes reports sont de 59. Installée dans mon jardin ou en portable le ROS ne dépasse pas 1,3 sur toute la bande (**figure 10**), ainsi je m'affranchis d'une boîte d'accord ! Le terrain

et la disposition des radiaux n'obligent pas à revoir le dispositif d'accord à la base de l'antenne.

Cette antenne déployée sans effort en 10 minutes a fait ses preuves lors de la sortie de plein air du radio club F5KAV dans le parc National des Vosges du Nord. Comparée à une antenne delta loop isocèle verticale dont la base était à plus de 5 m du sol et le sommet à 16,5 m, la Slinky reportait un signal de un à deux points S de moins avec des signaux toutefois très exploitables. La bande passante de cette antenne est étonnamment large par rapport à un dipôle horizontal ou une delta loop pour la même bande. Ceci s'explique par des pertes non négligeables tant au niveau de l'élément rayonnant en acier que par les trois radiaux au sol.

Ce concept d'antenne adaptée à la base a été reproduit pour la bande 20 m avec un brin vertical de 5,3 m et trois radiaux de 5,3 m résonnant sur toute la bande 14 MHz avec un ROS inférieur à 1,4. Ces expérimentations laissent entrevoir des possibilités pour un futur projet d'antenne verticale de 5 m avec une boîte d'accord automatique à la base qui couvrira les bandes de 7 à 28 MHz. Voilà de quoi préparer vos sorties d'été !

F5RCT Jean-Mathieu STRICKER

Références :

[1] Ressort Slinky :

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Slinky>

[2] Antennes Slinky : (recherchez *Slinky antenna*)

https://www.nonstopsystems.com/radio/frank_radio_antenna.htm

[3] Théorie et technique des antennes - Editeur : Vuibert 1973 ISBN : 2-7117-4208-3 – Auteurs de l'INSA de Lyon : L. Eyraud, G. Grange, H. Ohanessian

[4] Antenna Manuscript : (voir chapitre 2, pages 51 à 75)

http://www.antentop.org/library/shelf_Antenna_Manuscript.htm

[5] Site de F5ZV sur l'abaque de Smith : (recherchez *F5ZV Smith*)

<http://f5zv.pagesperso-orange.fr/RADIO/RM/RM23/RM23p/RM23p.html>

[6] Application en ligne de l'abaque de Smith : (recherchez *smith chart tool online*)

<http://cgi.www.telestrian.co.uk/cgi-bin/www.telestrian.co.uk/smiths.pl>