

Antennes Yagi au-dessus de 1000 MHz

Comment ajuster longueurs et espacements des éléments ?

Jean-Pierre Waymel, F5FOD

13 octobre 2025

v03

Résumé

Il y a maintenant une dizaine d'années, je m'étais mis en tête de réaliser un équipement capable d'effectuer la réception de la raie H1 de l'hydrogène sur 1420,40575 MHz soit $\lambda = 21,11$ cm, en arrondissant...

Première étape : construction d'une antenne Yagi. Je n'avais jamais construit moi-même une telle antenne et encore moins sur cette fréquence. Je ne connaissais ni EZNEC ni 4nec2, je n'avais jamais utilisé de VNA et je n'avais qu'une scie, une perceuse à main et quelques limes.

Les surprises furent nombreuses, l'apprentissage long et enrichissant mais pratiquement aucune de mes antennes réalisées ne résonnait sur la bonne fréquence.

Jusqu'à ce que Hartmut Klüver, DG7YBN me confie le « truc »... infallible !

Les éléments de l'antenne Yagi : vocabulaire utilisé dans cet article

- Le radiateur ou dipôle alimenté ou « DE » pour « Driven Element », idéalement résistif. Généralement, il a la forme d'un « dipôle demi-onde » ou d'un « trombone ».
- Un ou plusieurs « réflecteurs » ou « Re », essentiellement selfiques.
- Des « directeurs » ou « D » : D1, D2, D3, etc., D1 étant le directeur le plus proche de DE. Les directeurs sont essentiellement capacitifs.

Programme utilisé pour obtenir les longueurs des éléments et leurs espacements

Je commence par utiliser le programme DL6WU.BAS compilé avec QB64 puis son adaptation en page web réalisée par K7MEM :

https://www.k7mem.com/Ant_Yagi_VHF.html

Premier objectif

Avoir une antenne accordée sur 1420 MHz. À cette fréquence, son impédance Z aura donc idéalement la valeur suivante : $Z = R + j X = 50 + j 0$ ohms, si on choisit une impédance caractéristique égale à 50 ohms.

Première réalisation

Confiant, je me lance directement dans une version à 23 éléments :

- boom métallique carré, en aluminium, arête 15 mm,
- éléments isolés traversant le boom,
- DE : trombone, diamètre 3 mm, en cuivre,
- Re et D1 à D21 : diamètre 4 mm, en aluminium,
- balun : 4:1, en SM141, longueur 75 mm (soit $0,71 \times \lambda/2$, le coefficient de vitesse du câble coaxial semi-rigide utilisé SUCOFORM_141 étant égal à 0,71),
- connexion directe puis embase N.

Avec un VNA professionnel en prêt, je trouve une résonance aux environs de 1437 MHz :
déception ! Mais surtout : que faire ?

L'arête du boom est-elle trop grande par rapport à la longueur d'onde ?

Faut-il rallonger un ou plusieurs éléments, lesquels ?

La distance entre les deux parties horizontales du trombone n'est-elle pas trop grande ?

Les espacements entre éléments sont-ils corrects ? De toute façon, je ne peux les modifier facilement sans refaire l'antenne...

Le balun est-il de la bonne longueur ?

Le flasque de l'embase N modifie-t-il les caractéristiques du trombone ?

Autres causes ?

Boom en plastique et trombone mobile.

Afin d'éliminer une cause possible d'erreur, à savoir le métal du boom, je décide d'utiliser un boom en plastique (PVC).

Je fais l'acquisition d'un VNA, le MiniVNA Tiny, certes plus modeste.

Et passage à une connectique en SMA.

Plus modestement, je construis une *10 éléments* :

- boom plastique rond, diamètre 20 mm,
- éléments traversant le boom,
- DE : trombone, section 2,5 mm² (diamètre 1,78 mm), en cuivre, montage sur un collier-lyre en plastique permettant de le faire coulisser sur le boom, voir figure 1.
- Re et D1 à D8 : section 2,5 mm² (diamètre 1,78 mm), en cuivre,
- Balun identique, 4:1, en SUCOFORM_141, longueur 75 mm,
- Embase SMA.



Figure 1 : Le dipôle alimenté (DE trombone), le balun 4:1 et l'embase SMA, fixés sur un collier-lyre de façon à ce que l'ensemble puisse coulisser sur le boom en plastique.

Après d'innombrables essais négatifs, j'ajoute 2 mm à tous les éléments sauf au DE trombone. Ce qui revient à introduire un « Boom Correction » (BC) égal à 2 mm. J'obtiens enfin un premier résultat correct : $Z = 49,9 + j 0,0$ ohms à 1422 MHz.

Et en rapprochant de 2 mm le DE trombone vers le directeur D1, j'obtiens un excellent résultat : $Z = 50,4 + j 0,0$ ohms à 1420 MHz !

L'idéal serait donc d'avoir un dispositif de fixation des éléments qui permette de les déplacer facilement le long du boom. Et de les tenir éloignés du boom si ce dernier est métallique.

Oui mais quels éléments déplacer et de combien ? Dans quel ordre ? Mêmes questions pour modifier les longueurs des éléments !

Cherchant sur le web des informations plus précises concernant l'influence du boom métallique, je découvre le site d'Hartmut Klüver : <https://www.dg7ybn.de>

Je lui envoie un premier mail le 9 juillet 2016. Deux heures et demie plus tard, je reçois sa réponse et depuis cette date, nous sommes en contact régulier (cf. nos travaux sur le G/T des antennes et le logiciel AGTC...).

Son site fourmille d'informations mais la situation semble incertaine au-delà de 1000 MHz.

Simplifions donc la situation !

- Boom métallique carré, en aluminium, arête 10 mm.
- Tous les éléments montés sur « échasses » ! Voir figure 2.
- Abandon du trombone et adoption d'un dipôle demi-onde simple, en cuivre. Diamètre : 2,5 mm. Donc abandon du transformateur 4:1.
- Re et D1 à D8 : diamètre 3 mm, en aluminium.
- Pour « la fonction balun », utilisation d'un cylindre de ferrite (NiZ n° 61, diamètre interne : 6,35 mm, diamètre externe : 14,3 mm, hauteur : 13,45 mm, Fair-Rite réf. 2661540202), immobilisé par un serre-câble.
- Pas d'embase, soudure directe d'une courte longueur de câble coaxial SUCOFORM_141 (ici 121 mm), équipé à son autre d'extrémité d'une fiche SMA. Pour l'instant, le puits central de l'échasse n'a pas été utilisé ; il est destiné à faire passer le câble coaxial d'alimentation du dipôle demi-onde DE, une fois le boom percé.

(voir page suivante)

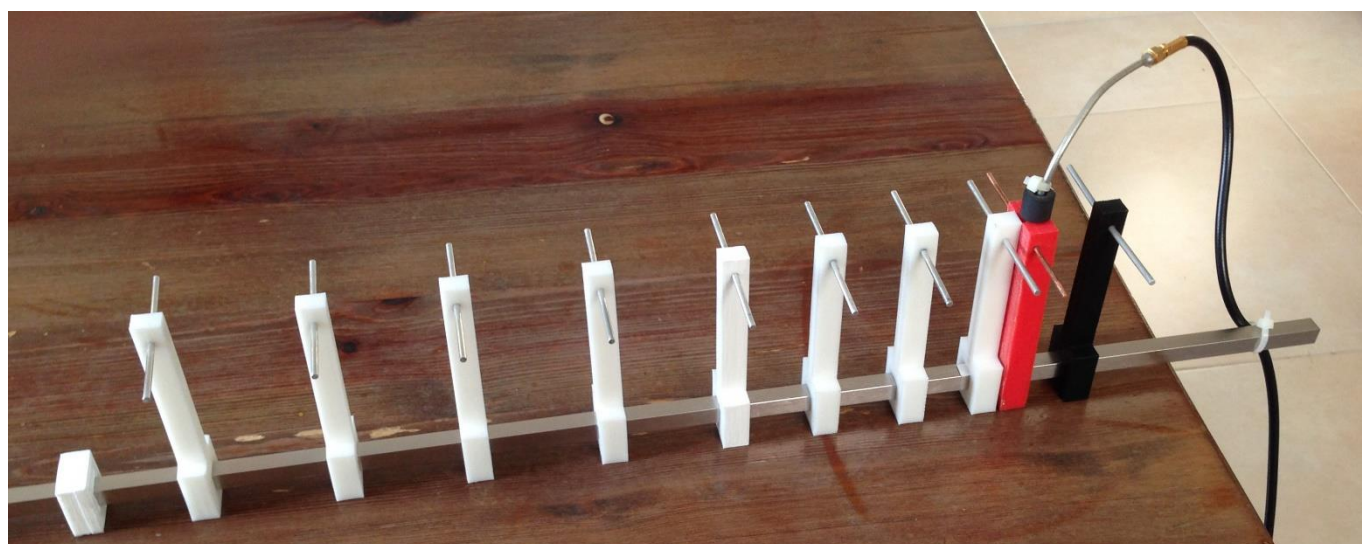


Figure 2 : L'antenne 10 éléments, montés sur « échasses ».

Les échasses

Les échasses sont réalisées avec une imprimante 3D, au radio-club F5KEE

<https://www.f5kee.fr/>, par ON6FS.

Les différentes couleurs ne sont dues qu'à la disponibilité des fils PLA.

Pour les échasses du réflecteur et des directeurs, voir le dessin figure 3.

Remarquons que le trou permettant le passage de la tige d'aluminium est d'un diamètre inférieur de 0,5 mm à celui de la tige elle-même. Ce qui permet de rentrer cette tige à frottement dur et donc de l'immobiliser correctement. Si nécessaire, agrandir doucement et progressivement le diamètre du trou, en faisant de nombreux essais d'insertion.

Pour l'échasse du dipôle demi-onde, voir le dessin figure 4 et la photo figure 5.

De même, remarquons que le trou permettant le passage des deux tiges de cuivre est d'un diamètre inférieur de 0,5 mm à celui des tiges elles-mêmes, et ceci pour les mêmes raisons.

Remarquons enfin que l'arête de la fenêtre carrée de passage du boom a une dimension inférieure de 0,3 mm à celle de l'arête du boom. Ce qui permet de rentrer chaque échasse à frottement dur tout en gardant la possibilité de l'avancer ou de la reculer à volonté. Il faut jouer délicatement de la lime sur l'intérieur des quatre faces pour arriver à un bon compromis « coulissement/immobilisation ».

Ainsi nous avons maintenant toute latitude pour ajuster la longueur de chaque élément ainsi que chacun des espacements entre éléments.

(voir page suivante)

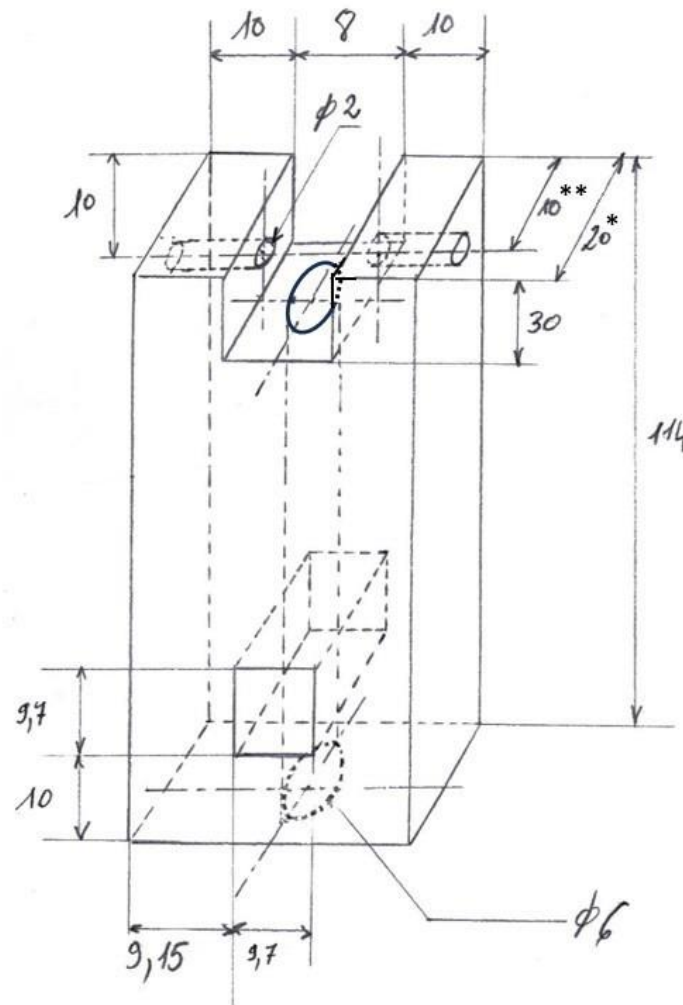


Figure 4 : L'échasse pour le dipôle demi-onde DE (attention : seules les valeurs numériques des cotes sont correctes, l'auteur n'étant pas très doué en dessin industriel !). Pour « 20° » et « 10 », voir « Troisième étape ».**

(voir page suivante)

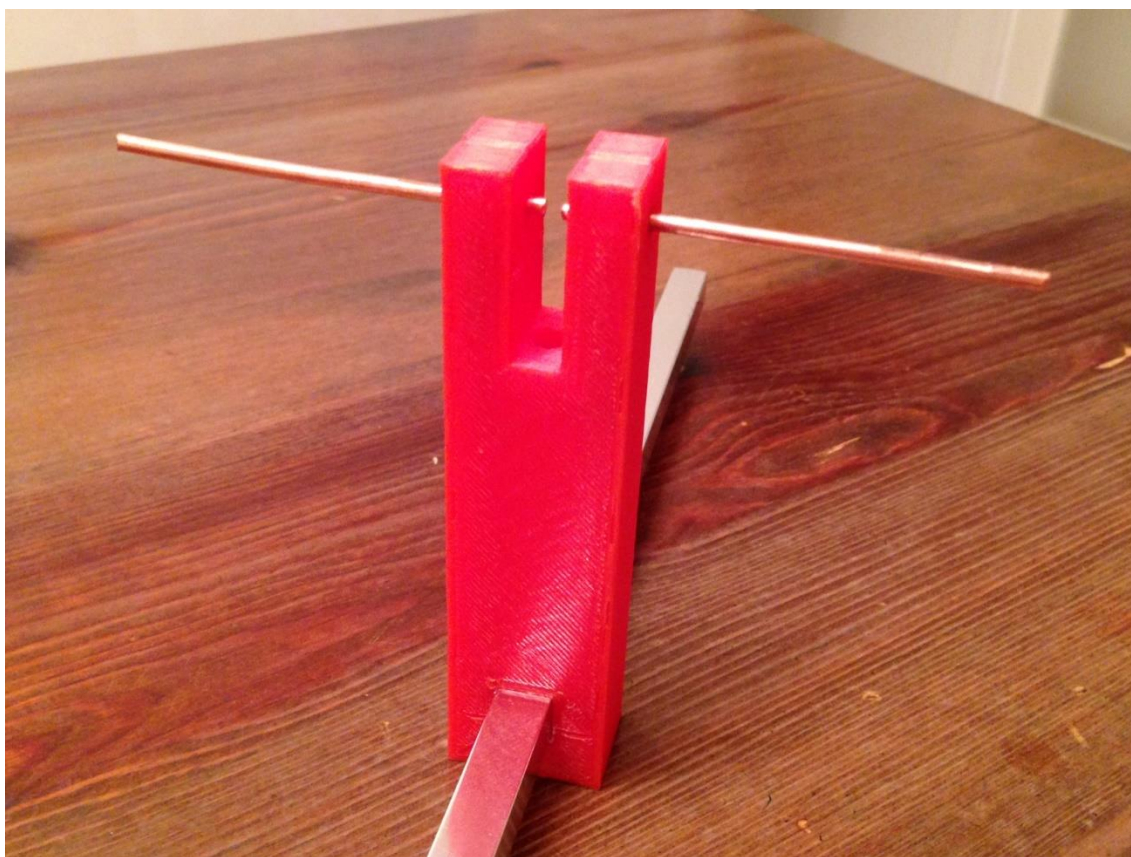


Figure 5 : Le dipôle demi-onde DE glissé dans son échasse en PLA et l'échasse glissée dans le boom métallique.

Oui, mais pour ajuster, par quoi commencer ?

On pourrait se dire : « Commençons par le dipôle demi-onde DE seul et ajustons sa longueur pour que la résonance tombe pile sur 1420 MHz. » Eh bien non ! En effet, dès que l'on ajoute le réflecteur Re, la fréquence de résonance de l'ensemble Re-DE s'éloigne de 1420 MHz ! On pourrait encore se dire : « Ajustons la ou les longueurs (celle du réflecteur Re et/ou celle du dipôle demi-onde DE ?) et réglons aussi l'espacement entre le réflecteur Re et le dipôle demi-onde DE pour retomber sur 1420 MHz ». On comprend vite que ça ne marche pas trop bien et que l'on a toutes les chances d'échouer en arrivant au directeur D8 !

La solution proposée par DG7YBN

Elle se déroule en trois étapes, qui vont être détaillées ci-après.

Première étape : élaborer la géométrie de l'antenne

Dans tout ce qui suit, on pourra très bien utiliser 4nec2 au lieu d'EZNEC... ou les deux !

Commençons par élaborer le modèle de l'antenne avec la page web K7MEM. Ce sera « l'antenne K7MEM ». La géométrie de ce modèle est résumée dans le tableau 1, partie gauche, en millimètres :

L_K7 = longueurs des éléments,
 Esp._K7 = espacements entre éléments,
 Esp. cumulés_K7 = espacements cumulés.

Puis optimisons ce modèle avec EZNEC. Ce sera « l'antenne EZNEC ». Nombre de segments dans EZNEC : 11. Dans le tableau 1, partie droite toujours en millimètres :

L_EZ = longueurs des éléments,
 Esp._EZ = espacements entre éléments,
 Esp. cumulés_EZ = espacements cumulés.

En rouge les valeurs EZNEC notablement modifiées par rapport à K7MEM.
 K7MEM indique une valeur de tolérance sur les dimensions égale à 0,63 mm !

Antenne K7MEM	L_K7	Esp._K7	Esp. cumulés_K7	Antenne EZNEC	L_EZ	Esp._EZ	Esp. cumulés_EZ
Re	102,07		0,00	Re	102,06		0,00
DE	99,97	42,22	42,22	DE	99,60	42,22	42,22
D1	88,52	15,84	58,06	D1	90,50	15,43	57,65
D2	87,25	38,00	96,06	D2	87,60	39,55	97,20
D3	85,91	45,39	141,45	D3	85,90	44,25	141,45
D4	84,65	52,78	194,23	D4	84,65	52,78	194,23
D5	83,56	59,12	253,35	D5	83,55	59,12	253,35
D6	82,62	63,33	316,68	D6	82,61	63,33	316,68
D7	81,81	66,51	383,19	D7	81,80	66,51	383,19
D8	81,10	69,67	452,86	D8	81,09	69,67	452,86

Tableau 1 : Les dimensions fournies par K7MEM : « l'antenne K7MEM », à gauche et retravaillées sous EZNEC : « l'antenne EZNEC », à droite.

L'antenne EZNEC donne $Z = 50,3 - j 0,6$ ohms à 1420 MHz.

Deuxième étape : dans EZNEC, trouver les fréquences de résonance de l'antenne EZNEC en la faisant progresser élément par élément depuis le dipôle demi-onde DE seul

Dans EZNEC, commençons par retirer tous les éléments de l'antenne EZNEC à l'exception du dipôle demi-onde DE. N'y modifier aucune donnée concernant ce dipôle. Toujours avec EZNEC, déterminer la fréquence F à laquelle l'impédance $Z = R + jX$ devient réelle. C'est-à-dire quand X a une valeur égale à zéro ou très proche de zéro. Noter cette fréquence et les valeurs correspondantes de R et X.

Ici : $Z = 72,1 + j 0$ ohms à **1377,00 MHz**.

Il apparaît de façon tout à fait évidente que les futurs autres éléments de l'antenne EZNEC une fois installés modifieront sa fréquence de résonance puisqu'au final elle sera égale à 1420 MHz !

Dans EZNEC, retirons maintenant tous les éléments sauf le dipôle demi-onde DE et le réflecteur Re. Ne rien modifier d'autre. Toujours avec EZNEC, déterminer la fréquence F à laquelle l'impédance $Z = R + jX$ devient réelle. Noter cette fréquence et les valeurs correspondantes de R et de X.

Ici : $Z = 32,6 + j 0$ ohms à **1315,00 MHz**.

Dans EZNEC, retirons tous les éléments sauf le dipôle demi-onde DE, le réflecteur Re et le directeur D1. Ne rien modifier d'autre. Toujours avec EZNEC, déterminer la fréquence F à laquelle l'impédance $Z = R + jX$ devient réelle. Noter cette fréquence et les valeurs de R et de X.

Ici : $Z = 14,4 + j 0$ ohms à **1451,50 MHz**.

Et ainsi de suite jusqu'au directeur D8 où l'antenne EZNEC retrouvera donc tous ses éléments dans EZNEC. Les résultats sont présentés dans le tableau 2, toujours avec L_EZ et Esp._EZ en millimètres puis R et X en ohms et F en MHz :

Antenne EZNEC	L_EZ	Esp._EZ	R	X	F
DE seul	99,60	42,20 ^a	72,1	0	1377,00
+Re	102,06		32,6	0	1315,00
+D1	90,50	15,40 ^b	14,4	0	1451,50
+D2	87,60	39,60	38,7	0	1362,50
+D3	85,90	44,30	25,1	0	1432,75
+D4	84,65	52,80	14,5	0	1463,25
+D5	83,55	59,10	39,1	0	1408,00
+D6	82,61	63,30	28,6	0	1436,75
+D7	81,80	66,50	20,7	0	1455,00
+D8	81,09	69,70	50,3	-0,6	1420,00

Tableau 2 : Les résonances de l'antenne EZNEC construite élément par élément à partir du dipôle demi-onde DE seul. Les « Esp._EZ » ont été arrondis au dixième de millimètre.

a : « Esp. » entre le réflecteur Re et le dipôle demi-onde DE ; b : « Esp. » entre le dipôle demi-onde DE et le directeur D1.

Notons les extraordinaires changements dans les valeurs de F, R et X au fur et à mesure de la « construction » de l'antenne !

Troisième étape : construire « l'antenne physique », élément par élément, dans le même ordre et en retrouvant les mêmes fréquences de résonance

« L'antenne physique » est... l'antenne réelle ! Il est temps de sortir le pied à coulisse, la scie et les limes.

Nous utiliserons un VNA pour effectuer les mesures de R et de X, que nous appellerons R' et X' pour les différencier des R et X de l'antenne EZNEC. Et bien entendu $Z' = R' + jX'$.

Mais tout d'abord, petit problème à résoudre. Dans le tableau 2, l'espacement entre le dipôle demi-onde DE et le directeur D1 est égal à 15,4 mm. Or si les deux échasses correspondantes sont glissées l'une vers l'autre jusqu'à ce qu'elles se touchent, on arrive à un espacement minimum entre les éléments eux-mêmes égal à $20/2 + 13/2 = 16,5$ mm. On pourra être amené à devoir le réduire à moins de 15,4 mm. Il convient donc de modifier la

cote 20 mm de l'échasse du dipôle demi-onde DE (marquée « 20* » figure 4) pour la ramener à 14 mm, la cote 10 mm (marquée « 10** ») restant inchangée. Ce qui nous donnera un espacement minimum possible entre le dipôle demi-onde DE et le directeur D1 égal à $(14 - 10) + 13/2 = 10,5$ mm.

Construction du dipôle demi-onde DE

Construisons maintenant l'antenne, élément par élément, en commençant par le dipôle demi-onde DE. Le but est d'ajuster la longueur L' de ce dipôle jusqu'à mesurer avec le VNA la bonne fréquence de résonance de l'antenne. C'est-à-dire ici 1377 MHz (voir tableau 2).

Bien entendu, on démarre avec un dipôle demi-onde DE plus long que les 99,6 mm du même tableau de façon à pouvoir le raccourcir. Attention : il faut y aller tout doucement ! À chaque étape, on note la longueur L' , la fréquence de résonance F' et les valeurs correspondantes R' et X' . Les résultats sont résumés dans le tableau 3. Les unités utilisées sont les mêmes que celles utilisées dans les tableaux précédents.

Le dipôle demi-onde DE de l'antenne réelle : mesures au VNA selon sa longueur L'			
L'	F'	R'	X'
105,8	1309,9	71,7	0
104,8	1325,0	72,0	0
103,8	1338,0	71,5	0
102,8	1353,0	71,9	0
102,0	1363,0	71,7	0
101,6	1370,0	71,8	0
101,2	1375,0	71,6	0

Tableau 3 : La construction du dipôle demi-onde DE physique.

- $L' = 105,8$ mm, au départ. C'est beaucoup mais sait-on jamais !
 F' au VNA = 1309,9 MHz.
 Z' au VNA = $71,7 + j 0$ ohms.
- $L' = 104,8$ mm, après quelques coups de lime.
 F' au VNA = 1325,0 MHz.
 Z' au VNA = $72,0 + j 0$ ohms.
- (...)
- $L' = 101,2$ mm.
 F' au VNA = 1375,0 MHz.
 Z' au VNA = $71,6 + j 0$ ohms.

Il faudrait encore raccourcir le dipôle demi-onde DE pour arriver à 1377 MHz mais le mieux est l'ennemi du bien. Et on ne touche plus à ce dipôle !

Bien entendu, le VNA doit avoir été correctement calibré au préalable et l'antenne placée à bonne distance de tout objet perturbateur, boom à 30° au-dessus de l'horizontale.

Construction du réflecteur Re

Ajoutons le réflecteur Re à son emplacement prévu dans le tableau 2, soit à 42,2 mm du dipôle demi-onde DE. Parti de 104,8 mm, diminuons petit à petit sa longueur L' pour trouver la résonance de l'ensemble Re-DE sur 1315 MHz, voir tableau 2. Quand on s'en approche, on peut jouer sur l'espacement Re-DE. Ici réduit d'un millimètre pour arriver à 41,2 mm (Esp.'). Il a fallu descendre jusqu'à $L' = 97,3$ mm pour obtenir la résonance sur 1315,6 MHz avec Z' égale à $32,5 + j 0$ ohms.

Et on ne touche plus ni au réflecteur Re ni au dipôle demi-onde DE !

Construction du directeur D1

Ajoutons maintenant le directeur D1 à son emplacement prévu dans le tableau 2, soit à 15,4 mm du dipôle demi-onde DE. Parti de 95,8 mm, diminuons petit à petit sa longueur L' pour trouver la résonance de l'ensemble R-DE-D1 sur 1451,5 MHz, voir tableau 2.

Attention : c'est un élément critique ! On diminue sa longueur et on cherche à chaque fois une résonance proche de l'objectif en faisant varier également l'espacement (Esp.') DE-D1 mais uniquement en faisant glisser le directeur D1 vers le dipôle demi-onde DE. En effet, le dipôle demi-onde doit absolument rester en place. À $L' = 92$ mm, on obtient une résonance sur 1449,3 MHz avec Z' égale à $13,7 + j 0$ ohms. Mais surtout, il a fallu réduire l'espacement DE-D1 à 11,4 mm ! Heureusement qu'une cote de l'échasse du dipôle demi-onde DE avait été modifiée pour permettre ce rapprochement.

Et on ne touche plus ni au réflecteur Re ni au dipôle demi-onde DE ni au directeur D1 !

À noter : dans tous mes essais précédents, j'avais toujours dû rapprocher le directeur D1 du dipôle demi-onde DE pour améliorer les résultats.

Construction des directeurs D2 à D8

On répète la même procédure jusqu'à l'ajout final du directeur D8...

Les résultats sont présentés dans le tableau 4.

Antenne EZNEC	L_EZ	Esp._EZ	R	X	F	Antenne physique	F'	L'	Esp.'	R'	X'
DE seul	99,60	42,20 ^a	72,1	0	1377,00	DE seul	1375,00	101,20	41,2 ^a	71,6	0
+Re	102,06		32,6	0	1315,00	+Re	1315,60	97,30		32,5	0
+D1	90,50	15,40 ^b	14,4	0	1451,50	+D1	1449,30	92,00	11,4 ^b	13,7	0
+D2	87,60	39,60	38,7	0	1362,50	+D2	1363,00	88,60	40,3	38,3	0
+D3	85,90	44,30	25,1	0	1432,75	+D3	1433,00	87,00	43,8	25,2	0
+D4	84,65	52,80	14,5	0	1463,25	+D4	1463,30	85,80	47,0	14,3	0
+D5	83,55	59,10	39,1	0	1408,00	+D5	1407,80	82,70	62,5	39,1	0
+D6	82,61	63,30	28,6	0	1436,75	+D6	1437,80	84,70	64,9	29,1	0
+D7	81,80	66,50	20,7	0	1455,00	+D7	1456,20	83,20	62,7	20,3	0
+D8	81,09	69,70	50,3	-0,6	1420,00	+D8	1420,26	84,90	68,5	50,1	0

Tableau 4 : L'antenne EZNEC et l'antenne physique (a et b : voir tableau 2).

Écarts de dimension entre l'antenne physique réelle et l'antenne EZNEC

Les écarts de dimension (longueurs des éléments et espacements entre éléments) sont résumés dans le tableau 5. En rouge quand les valeurs absolues de ces écarts sont supérieures ou égales à 2 millimètres.

	$L' - L_EZ$	$Esp' - Esp._EZ$
Re	-4,8	
DE	+1,6	-1,0
D1	+1,5	-4,0
D2	+1,0	+0,7
D3	+1,1	-0,5
D4	+1,2	-5,8
D5	-0,9	+3,4
D6	+2,1	+1,6
D7	+1,4	-3,8
D8	+3,8	-1,2

Tableau 5 : Les écarts de dimension en millimètres entre l'antenne réelle et l'antenne EZNEC.

Longueurs des éléments physiques

Elles sont toutes plus grandes que les longueurs EZNEC sauf pour le réflecteur Re et le directeur D5. Phénomène sans doute dû au coefficient de vélocité du PLA. Sauf pour le directeur D5 ?

Le réflecteur est plus court que le dipôle demi-onde.

Espacements des éléments physiques

Comme déjà indiqué, le directeur D1 doit être rapproché du dipôle demi-onde.

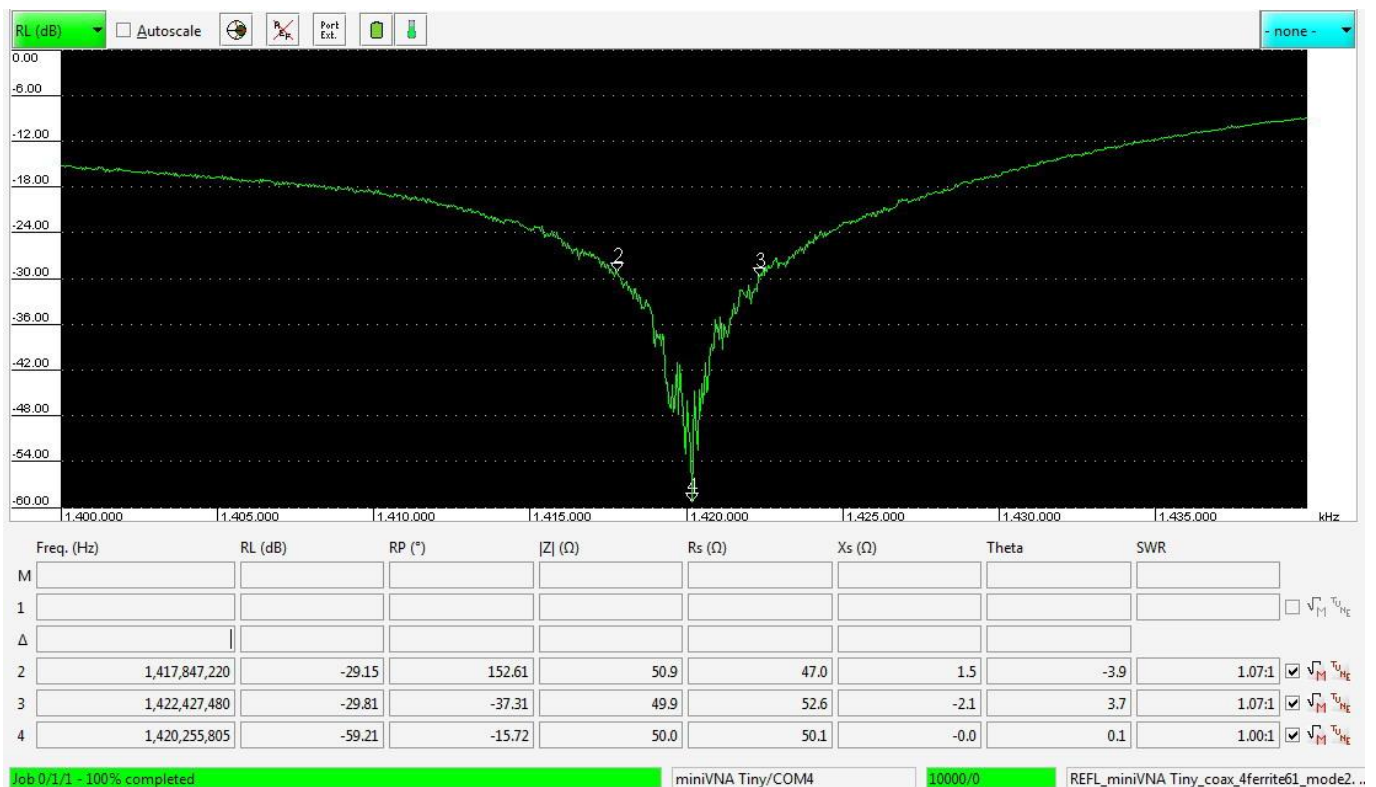
Mesures finales au VNA

Les mesures finales au VNA sont résumées dans le tableau 6 et sur la figure 6.

F'' MHz	R'' Ω	X'' Ω	RL dB	ROS
1417,85	47,0	+1,5	-29,15	1,07
1420,26	50,1	0	-59,21	1,00
1422,43	52,6	-2,1	-29,81	1,07

Tableau 6 : Les mesures finales au VNA.

(voir page suivante)



Conclusion

Il faudrait faire de nombreuses autres constructions d'antenne en suivant la même procédure et surtout faire des mesures pour voir à quoi ressemblent les diagrammes de rayonnement réels de ces antennes ainsi construites !

Et trouver un matériau adéquat pour fabriquer les échasses afin qu'elles soient solides et puissent résister aux UV...

Quelques références

Antenna Theory, Third Edition, Analysis and Design, de Constantine A. Balanis

Antennas, Second Edition, de John D. Kraus

Modern Antenna Design, Second Edition, de Thomas A. Milligan

Yagi Antenna Design, de Peter P. Vezbicke, NBS, 12/1976

Yagi Antennas, Principle of Operation and Optimum Design Criteria, de G. Hoch, DL6WU, VHF Communications 3/1977

More Gain with Yagi Antennas, de Günter Hoch, DL6WU, VHF Communications 4/1977

Extremely Long Yagi Antennas, de Günter Hoch, DL6WU, VHF Communications 3/1982

Effective Noise Temperatures of 4-Yagi-Arrays for 432 MHz EME, de Rainer Bertelsmeier, DJ9BV, DUBUS, 4/1987

DL6WU-Yagi for 2320 MHz, de Rainer Jaeger, DC3CY, DUBUS 4/1989

Yagi-Antennas for 144 MHz, de Rainer Bertelsmeier, DJ9BV, DUBUS 1/1990

High Gain Yagis for 432 MHz, de Rainer Bertelsmeier, DJ9BV, DUBUS, 2/1991

DL6WU Yagis for 23 cm, de Rainer Bertelsmeier, DJ9BV, DUBUS 2/1994

A Homebrew Yagi for 1296 MHz DX, de Heinrich F. Reckemeyer, DJ9YW, DUBUS 1/2006

Building UHF Yagis – A Practical Approach, de Jim Klitzing, W6PQL, ARRL QST, 08/2006